

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TÜNEL KAZILARINDA OPTİMUM ÇELİK
BORU KEMER BOYUTUNUN NÜMERİK
MODELLEME İLE TAYİNİ

Samet Can ÖZER

Ağustos, 2011
İZMİR

TÜNEL KAZILARINDA OPTİMUM ÇELİK BORU KEMER BOYUTUNUN NÜMERİK MODELLEME İLE TAYİNİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Maden Mühendisliği Bölümü, Maden İşletme Anabilim Dalı

Samet Can ÖZER

Ağustos, 2011

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

SAMET CAN ÖZER, tarafından DOÇ. DR. C. OKAY AKSOY yönetiminde hazırlanan “TÜNEL KAZILARINDA OPTİMUM ÇELİK BORU KEMER BOYUTUNUN NÜMERİK MODELLEME İLE TAYİNİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

DOÇ. DR. C. OKAY AKSOY

Danışman

Doç. Dr. Çağrı PAMUKÇU

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Selim ALTUN

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Mustafa SABUNCU

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Başta tezimi ve çalıŐmalarımı yönlendiren, hiçbir yardımı esirgemeyen ve her konuda bakıŐ aımın geliŐmesinde emeği bulunan çok değerli hocam ve yol göstericim Doç Dr. C. Okay AKSOY'a,

Her konuda yardımını ve desteğini esirgemeyen değerli arkadaŐım AraÇ. Gör. Vehbi ÖZACAR'a,

Her türlü maddi ve manevi destekleriyle hep yanımda olan ve beni yalnız bırakmayan sevgili aileme sonsuz sayĐı ve teŐekkürlerimi sunarım.

Samet Can ÖZER

TÜNEL KAZILARINDA OPTİMUM ÇELİK BORU KEMER BOYUTUNUN NÜMERİK MODELLEME İLE TAYİNİ

ÖZ

Son yüzyılda çok hızlı gelişen dünyamızda, tünelciliğin de ihtiyaçlara bağlı olarak çok hızlı geliştiği görülmüştür. Özellikle çok büyük şehirlerdeki, şehir içi ulaşımın büyük problem olmasıyla birlikte, metrolar ile yer altı raylı sistem toplu taşımacılığı zorunluluk haline gelmiş ve çok yaygınlaşmıştır. Ülkemizde de son dönemde büyük şehirlerimizin metro ihtiyaçları anlaşılmış ve çalışmalar hızlandırılmıştır.

Tünel mühendisliği açısından, tünelciliğin kendine özgü problemleri dışında büyük sorunlarından biri de metro tüneli inşaatlarında şehirleşmenin getirdiği “yukarıda yaşanan hayata müdahale etmeden yeraltındaki projeyi yürütebilme” problemidir. Bunun başında güzergah üzerindeki yapıların güvenliği gelir. Genellikle sığ tüneller olan metro tünellerinin güzergahı üzerindeki yapılaşmanın, oluşacak zemin oturmalarından etkilenecek olması “zemin oturmalarına izin veren” tünelcilik felsefelerine imkan vermemektedir.

Özellikle zemin koşullarının kötü (zayıf) olduğu formasyonlar da işler daha da zorlaşmakta, kazı yapmak imkansız hale gelebilmektedir. Zeminin kendini taşıyamadığı özellikle de ayna stabilitesinin sağlanamadığı durumlar için zemin iyileştirme çalışmaları geliştirilmiştir. Çelik Boru Kemer Uygulaması, zemin iyileştirme çalışması olarak tüneller için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde tünel cidarı çevresine, tünel doğrultusunda ve belirli uzunlukta içi boş çelik borular yerleştirilir. Bu borulardan enjeksiyon yapılarak tünel çevresinde yapay, taşıyıcı bir katman oluşturulur. Bu yöntem sayesinde zemin oturmaları önemli miktarda önlenmiş olmaktadır.

Ancak bütün mühendislik uygulamalarında olduğu gibi bu uygulamada da güvenliğin en az maliyetle sağlanması başlıca prensiplerdendir. Bu yöntemde kullanılan boruların çapları ve uzunluklarının değişebildiği için bu değişimin optimizasyonu oldukça önemlidir. Çünkü bu değişiklikler, harcanan çelik

miktarından kullanılacak delgi ve yerleştirme cihazına kadar birçok maliyet kalemini doğrudan etkilemektedir. Örneğin genellikle kullanılan 4 in çaplı borular için özel bir delgi ve yerleştirme cihazı gerekmekte iken daha küçük çaplı boruların ekskavatöre eklenen bir ekipman ile sağlanabilmektedir.

Bu tezin amacı, elik Boru Kemer Yönteminde kullanılan boruların çaplarının nümerik modelleme yoluyla optimize edilerek ayna ve yüzey deformasyonlarını minimuma indirecek en uygun boru boyutunun seçilmesi sağlanacaktır. Bu sayede güvenliğin minimum maliyetle sağlanması mümkün olacaktır. Bu alışma için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanan PLAXIS 3D Tunnel Version programı kullanılmıştır.

Anahtar sözcükler: elik boru kemer yöntemi, nümerik modelleme, zayıf zemin, zemin iyileştirme

DETERMINATION OF OPTIMUM UMBRELLA ARCH SIZE BY NUMERICAL MODELLING IN TUNNEL EXCAVATIONS

ABSTRACT

Tunnelling has developed fastly depending demands of fast growing world in the last century. Public transportation with underground railways have become a necessity especially for urban transportation within big cities began to become a big problem. Metro demands of our big cities have been understood and works has been accelerated in our country in recent years.

One of the big problems of metro tunnel constructions except distinctive problems of tunnel engineering is, tunnelling under urbanized area. The safety of the buildings above the tunnel route are incredibly important. Generally metro tunnels are shallow tunnels so buildings over the tunnel can be easily affected by ground settlements. Therefore tunnelling philosophies which allow settlements are not available for this kind of tunnels.

Generally, works get difficult especially in weak grounds and making excavation becomes impossible. Ground improvement methods are developed for conditions like ground can't support itself or tunnel face can't be stabilized. Umbrella Arch Method is a ground improvement method developed for tunnels. In this method, hollow steel pipes with a certain length are embedded through the tunnel direction around the tunnel face. An artificial shell is created around the tunnel by pumping injection from inside of these pipes. This method mostly prevents ground settlements.

However safety with least cost is very important in this application as in all engineering applications. The optimization of the pipes' sizes is extremely important because it directly affects the quantity of steels used and choice of machine for drilling and embedding both.

The objective of this research is, choosing the optimum steel pipe diameters by numerical modelling to prevent face and surface deformations. Thus, safety can be ensured with minimum cost. PLAXIS 3D Tunnel Version is used for Finite Element Model in this research.

Keywords: Umbrella arch method, numerical modelling, weak ground, ground improvement

İÇİNDEKİLER

Sayfa

| | |
|--|-----|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU | i |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZ | iv |
| ABSTRACT | vi |

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ - TÜNELCİLİK YÖNTEMLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ 3

| | |
|--|----|
| 2.1 Kısa Tünelcilik Tarihi | 3 |
| 2.2 Tünel Açma Yöntemleri..... | 6 |
| 2.2.1 Tam Kesitli Yöntemler..... | 8 |
| 2.2.2 Parça Kesitli Yöntemler | 9 |
| 2.2.2.1 Alman Yöntemi | 9 |
| 2.2.2.2 Belçika Yöntemi | 10 |
| 2.2.2.3 İtalyan Yöntemi..... | 11 |
| 2.2.2.4 Eski Avusturya Yöntemi | 12 |
| 2.2.2.5 İngiliz Yöntemi | 13 |
| 2.2.2.6 İsviçre Yöntemi..... | 13 |
| 2.2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)..... | 14 |
| 2.3 Tünel İnşaatlarında Zemin İyileştirme | 21 |
| 2.3.1 Tanım ve Yöntemler | 21 |
| 2.3.2 Çelik Boru Kemer Yöntemi (Umbrella Arch Method)..... | 22 |

BÖLÜM ÜÇ - İNCELEME ALANININ GENEL JEOLJİSİ VE MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ..... 27

| | |
|--|----|
| 3.1 Genel Jeoloji..... | 27 |
| 3.2 Tünel Güzergahı Boyunca Karşılaşılması Olası Jeolojik Birimler ve Mühendislik Özellikleri..... | 36 |

| | |
|---|-----------|
| BÖLÜM DÖRT - NÜMERİK MODELLEME VE ANALİZ..... | 44 |
| 4.1 Kaya Mühendisliğinde Nümerik Modelleme..... | 44 |
| 4.2 Tünel Tasarımlarında Kullanılan Nümerik Yöntemler | 47 |
| 4.2.1 Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) | 47 |
| 4.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)..... | 49 |
| 4.2.3 Sınır Elemanları Yöntemi (BEM)..... | 51 |
| 4.2.4 Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) | 53 |
| 4.2.5 Ayrık Çatlak Ağı Yöntemi (DFN) | 54 |
| 4.2.6 Hibrit Modeller | 55 |
| 4.3 Çelik Boru Kemer Boyutlarının Nümerik Model ile Belirlenmesi..... | 56 |
| BÖLÜM BEŞ - SONUÇ..... | 79 |
| KAYNAKLAR | 81 |

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Son yüzyılda çok hızlı gelişen dünyamızda, tünelciliğin de ihtiyaçlara bağlı olarak çok hızlı geliştiği görülmüştür. Özellikle çok büyük şehirlerdeki, şehir içi ulaşımın büyük problem olmasıyla birlikte, metrolar ile yer altı raylı sistem toplu taşımacılığı zorunluluk haline gelmiş ve çok yaygınlaşmıştır. Ülkemizde de son dönemde büyük şehirlerimizin metro ihtiyaçları anlaşılmış ve çalışmalar hızlandırılmıştır.

Tünel mühendisliği açısından, tünelciliğin kendine özgü problemleri dışında büyük sorunlarından biri de metro tüneli inşaatlarında şehirleşmenin getirdiği “yeryüzünde yaşanan hayata müdahale etmeden yeraltındaki projeyi yürütebilme” problemidir. Bunların başında güzergah üzerindeki yapıların güvenliği gelir. Genellikle sığ tüneller olan metro tünellerinin güzergahı üzerindeki yapılaşmanın, oluşacak zemin oturmalarından etkilenecek olması “zemin oturmalarına izin veren” tünelcilik felsefelerine imkan vermemektedir. Bu tez kapsamında tünelciliğin kısa tarihiyle birlikte konvansiyonel tünel açma yöntemleri kısaca anlatılmıştır. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemine kadar olan gelişmeler anlatılmış ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin başlıca problemlerinden bahsedilmiştir.

Özellikle zemin koşullarının kötü (zayıf) olduğu formasyonlar da işler daha da zorlaşmakta, kazı yapmak imkansız hale gelebilmektedir. Zeminin kendini taşıyamadığı özellikle de ayna stabilitesinin sağlanamadığı durumlar için zemin iyileştirme çalışmaları geliştirilmiştir. Çelik Boru Kemer Uygulaması, zemin iyileştirme çalışması olarak tüneller için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde tünel cidarı çevresine, tünel doğrultusunda ve belirli uzunlukta içi boş çelik borular yerleştirilir. Bu borulardan enjeksiyon yapılarak tünel çevresinde yapay, taşıyıcı bir katman oluşturulur. Bu yöntem sayesinde zemin oturmaları önemli miktarda önlenmiş olmaktadır. İlerleyen bölümlerde kısaca zemin iyileştirme yöntemlerinden ve özellikle Çelik Boru Kemer Yönteminden bahsedilmiştir.

Ancak bütün mühendislik uygulamalarında olduğu gibi bu uygulamada da güvenliğin en az maliyetle sağlanması başlıca prensiplerdendir. Bu yöntemde kullanılan boruların çapları ve uzunluklarının değişebildiği için bu değişimin optimizasyonu oldukça mühimdir. Çünkü bu değişiklikler, harcanan elik miktarından kullanılacak delgi ve yerleştirme cihazına kadar birçok maliyet kalemini doğrudan etkilemektedir. Örneğin genellikle kullanılan 4 in çaplı borular için özel bir delgi ve yerleştirme cihazı gerekmekte iken daha küçük çaplı borularınki ekskavatöre eklenen bir ekipman ile sağlanabilmektedir.

Bu tezin amacı, elik Boru Kemer Yönteminde kullanılan boruların çaplarının nümerik modelleme yoluyla optimize edilerek ayna ve yüzey deformasyonlarını minimuma indirecek en uygun boru boyutunun seçilmesi sağlanacaktır. Bu sayede güvenliğin minimum maliyetle sağlanması mümkün olacaktır. Bu alışma için Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanan PLAXIS 3D Tunnel Version programı kullanılmıştır. Bu sebeple kaya mühendisliğinde kullanılan nümerik modelleme yöntemleri anlatılmış ve daha sonra da jeoteknik parametreleri belirlenen sahanın nümerik modellemesi yapılmıştır.

BÖLÜM İKİ

TÜNELCİLİK YÖNTEMLERİ VE TARİHSEL GELİŞİMİ

2.1 Kısa Tünelcilik Tarihi

“Tünel” kelimesi Güncel Türkçe Sözlükte “Bir yandan öbür yana geçebilmek için yer altında, genellikle dağların içinde açılan yol” ve “Çevresi kapalı yol” olarak tanımlanmaktadır. Doğa, milyonlarca yıldır insana ihtiyaç duymaksızın kendi yollarını yaratmıştır. Dehliz ve mağara denen bu tüneller genellikle suyun (deniz suyu ve akarsu) aşındırıcı etkisiyle oluşmuşlardır. Dünyada ve ülkemizde birçok örnek bulunmaktadır. Bunlara Ürnlü-Düdednsuyu Mağarası, Alanya’daki Damlataş Mağarası, Burdur’daki İnsuyu Mağarası, Silifke’deki Cennet Cehennem Mağaraları ve Fransa’daki Padirac Yer altı Uçurumu, Dargilan Mağarası, Belçika’daki Han Mağaraları ve New Meksiko’daki Carlsbat Mağaraları örnek gösterilebilir (Bozkurt, 1987).

İnsanoğlu ise çok çeşitli sebeplerle (su getirmek, madencilik vb.) tünel açmaya başlamış ve kendini geliştirmiştir. Bunların ilki M.Ö. 40.000’li yıllarda Svaziland’daki Bomvu Tepesinde, Neandertaller tarafından kazılan Dünyanın en eski madenidir. Daha sonraları elle kazma tekniği geliştirilerek ateş tekniği kullanılmıştır. Bu teknikte kayanın yakınında bir yangın çıkartılarak kayanın çatlatılması hedeflenmiştir. Ancak ilk tünelin M.Ö. 2200’lerde Babil’de Sarayın altından Belos Tapınağıyla iletişim kurabilmek için, aç-kapa yöntemiyle yapıldığı düşünülmektedir. Daha sonra birçok medeniyet tünel kazmaya devam etmiştir. Bazıları Mısırlıların yaptığı gibi dini rol üstlenirken, bazıları da Dicle ve Fırat Nehirleri arasında inşa edilen kehrizler gibi suyu kaynağından alıp şehirlere getirecek kanallar gibi hidrolik işler için kullanılmıştır. Çok yakın zamanlara kadar Çin ve Hindistan’daki tüneller dini amaçlar için kullanılmıştır. Örneğin Hindistan’daki Ellora ve Ajanta manastırları dağın içine oyulmuş veya Budist tapınakları İpek Yolu boyunca kayalara oyulmuştur. Mühendisi bilinen ilk tünelin M.Ö. 530’da Samos Adasında açıldığı bilinmektedir. 1 km uzunluğundaki Shiloah Tüneli, mühendis Eupalinos de Megara tarafından şehre

su sağlamak amacıyla yapılmıştır. Tünelcilik, Romalıların zamanında oldukça yoğun gelişme göstermiş, madencilikten su sağlamaya, kanalizasyondan yollara, askeri tünellerden yer altı mezarlarına kadar geniş bir yelpazeye yayılmıştır. Ancak Roma Döneminden sonraki Orta Çağ'da madencilik ve defansif sebeplerle yeraltında açılan kaleler (yaklaşık 10.000 kişiye ev sahipliği yapabilen Kapadokya'daki Derinkuyu yeraltı kasabası gibi) dışında pek bir gelişme yaşanmamıştır. Rönesans zamanlarında ise insanoğlu gibi tünelcilik de uyanmıştır. Da Vinci kentleşme projelerinde yer altı boşluklarının kullanımını kavramış ve dağlara tünel açarak suyu taşıma ihtimalini düşünmüştür. Rönesans'ın ilk tüneli, köyü tehdit eden sel sularının yönünü değiştirmek amacıyla açılan İspanya Daroca'daki 600 m uzunluğundaki madendir. 1679-1681'de Fransa'da açılan Mal-Passe Tüneli bir kanal için açılan ilk tüneldir. Bu tünel 160 m uzunluğa, 7m genişlik ve 8 m yüksekliğe sahiptir ve tarihte ilk kez patlayıcı madde (barut) kullanılarak kazılmıştır. Bu durum tünelcilikte modern tekniklerin kullanılmasını başlatmış ve Avrupa'nın birçok yerinde kanal tünelleri açılmaya başlanmıştır (Jimeno, çev., 2000).

18. yüzyıl boyunca kanal inşaatlarıyla elde edilen tünel mühendisliği tecrübesi ve yaşanan sanayi devrimi ve demiryolu taşımacılığındaki yükseliş büyük bir gelişme sağlamıştır. 19. Yüzyıl tünelcilik tarihi açısından belirleyici bir zaman olmuştur. Demiryolu taşımacılığı 17. Yüzyıldan beri kullanıyor olmasına rağmen, gerçek kırılma 1825'te buhar makinesinin icadıyla olmuş ve lokomotifler için yeni itici güç olmuştur. Bu buluşlar demiryolu mühendisliğinde büyük bir beklentiye sebep olmuş ve demiryolu inşasında patlamaya yol açmıştır. Bütün Avrupa'daki başlıca büyük şehirler arasında demiryolları inşası başlamış ve tünellere ihtiyaç duyulmuştur. İlk demiryolu tüneli Fransa'da Roanne-Andrezieux arasındaki 1477 m uzunluğundaki Terre-Noir tünelidir. İngiltere de ise Liverpool ve Manchester arasındaki demiryolu bağlantısı için biri 5 diğeri 1,6 km olan iki tünel inşa edilmesi gerekmiştir. 19. Yüzyılın ikinci yarısı trans-alp tünellerinin inşasına tanık olmuş ve bu zorlu sıra dağların kuzeyini güneyine demiryolları ile bağlayacak dikkate değer bir mühendislik örneği gösterilmiştir. Frejus Demiryolu Tüneli, Gotthard ve Simplon Tünelleri gibi tüneller, insan azminin ve doğa üzerindeki zaferinin somutlaşmasıdır. Dönemin gösterişsiz aletleriyle, sırasıyla 12,6 km, 15,2 km ve 19,7 km uzunlukta

açılan bu tüneller, tünel mühendisliği için bir sıçrama tahtası olmuştur (Jimeno, çev., 2000).

19. Yüzyıl aynı zamanda bir su yolunun altından geçen ilk tünelin kazısını da görmüştür. 1843'te mühendis Marc Brunnel, Thames nehrinin altındaki ilk tüneli bitirmiştir. Su içeren yumuşak kaya içinde kazılan bu tünel, "Shield" yönteminin kullanıldığı ilk uygulamadır. Bu sırada ABD'de de tüneller büyük bir gelişmeye tanık olmuştur. 1869 ve 1871 yıllarında Şikago şehrindeki nehrin altında iki tünel açılmıştır. Yine "shield" yönteminin kullanılmasıyla 19. Yüzyılın sonunda inşa edilen ve ABD ile Kanada'yı 6,45 m çapında bir açıklık ile Saint Clair nehrinin altından bağlayan Hoosac Tüneli ve Saint Clair Tünelinin kazısında ilk defa nitrogliserin kullanılmıştır. 19. Yüzyılın sonu aynı zamanda çok büyük bir sıçramaya tanıklık etmiş ve 1863'de Londra Metrosunun inşası şehirlerin altında yeni bir toplu taşımacılık modası için bir başlangıç noktası olmuştur. Londra metrosundan sonra Paris, Viyana, Stokholm, Waşington ve Glasgow gibi pek çoğu takip etmiştir (Jimeno, çev., 2000).

20. Yüzyılın başlarında otomobil kullanımının yaygınlaşması yol mühendisliğinde büyük bir gelişmeye ve Avrupa ile Kuzey Amerika'da yolların hızla genişlemesine sebep olmuştur. 20. Yüzyıl yolların devri olmuş ve onlarla birlikte sayısız şehir ve şehirlerarası tünelde ışık görülmüştür. Budapeşte'deki tünel ve Hamburg'da Elba'nın altındaki tünel, kentler için yol tünellerinin öncüleri olan örneklerdir. Şehirlerarası yol tünellerinin patlaması ise 2. Dünya Savaşı sonrası olmuştur. Alpler 19. Yüzyılda demiryollarıyla aşılrken şimdi de arabaların ve kamyonların Alplerin iki tarafı arasında gidip gelebileceği yol tünellerinin kazısına şahit olunmuştur. Gotthard yol tüneli 1980'de bitirilmiş ve 17 km uzunluğu ile 21. Yüzyılda Laerdal tüneli yapılıncaya kadar dünyanın en uzun yol tüneli olmuştur. 1980'den sonra yeni sıçrama yüksek hızlı demiryollarının yaygınlaşmasıyla oldu. Bu hatlar oldukça az yükseklik farkı değerlerine ve eğimler için çok uzun çaplara ihtiyaç duymaktaydılar ki bu da ancak uzun ve derin tünellerle sağlanabilirdi. 1983'te Japonya'daki Tsugaru boğazının altında 54 km uzunluğundaki Seikan demiryolu tüneli yapılmış ve Honshu ve Hokkaido adlı iki ana adayı birbirine bağlamıştır. Bu tünel dünyanın ilk başlıca

yüksek hızlı demiryolu tüneldir ve uzunluk rekorları kırmasının yanında tünel mühendisliğinde birçok başlıca teknolojik başarıya ihtiyaç duymuştur. İskandinavya'da Norveç yer altı inşası ve tünel mühendisliğinde dünyanın lider ülkelerinden biri haline gelmiştir. Derin fiyordları aşmak ve adaları kıtaya bağlamak için denizaltı yol tünelleri inşa edilmiştir. Vardo tüneli 1982'de inşa edilmiş ve Vardo adasını kıta Norveç'ine bağlayarak bu ülkedeki ilk denizaltı yol tüneli olmuştur. Bu tünelin inşasından sonra birçok tünel kazılmıştır. Bunlardan en ünlüsü 2000 yılında bitirilen ve 24,5 km uzunluğuyla dünyanın en uzun yol tüneli unvanını alan Laerdal tüneldir. Ancak tünel mühendisliği tarihindeki büyük bükülme noktası Manş Tünelinin İngiltere ve Fransayı bağlaması ile olmuştur. Bu tünelin inşası yaklaşık 200 yıllık bir hayalin gerçekleşmesine sebep olmuştur. 19. Yüzyıldaki birkaç proje ve kazı girişiminden sonra 1994'te Manş Tünelinin inşası İngiltere ile Fransa'nın 38 km'si denizin altında olan 51 km uzunluğundaki bir tünel ile bağlanması gerçekleşmiş oldu. Bu tünel, tünel kazma teknolojilerinde bir sıçramaya sebep olmuş ve TBM'lerin kullanımında bir devrimi başlatmıştır. Gerçekten de 20. Yüzyılın kalan kısmında ve 21. Yüzyılın başlarında yüksek hızlı demiryolu hatlarının bütün AAvrupa boyunca yaygınlaşması ve özellikle onların zahmetli geometrik koşulları TBM'lerin kullanımında büyük bir devrime zorlamıştır. 20. Yüzyılın son yılları ve 21. Yüzyılın başları, rekorlar kırarak sıra dağları aşan Lotschberg, Gotthard, Ceneri, Guadarrama, Pajares, Brenner ve Lyon-Torino tünelleri gibi tüneller 50 km'lere ulaşan uzunlukları, birkaç bin km derinlikleri ve sıkışma, parçalanma, kaya patlaması, su basıncı ve yüksek gerilimli kaya kütleleri gibi çok zor koşullarda mekanize tünelciliği inanılmaz seviyelere taşımışlardır (Jimeno, çev., 2000).

2.2 Tünel Açma Yöntemleri

Tünel açma yöntemleri ilerleme türüne göre parçalı kesit, tam kesit ve aç-kapa yöntemi olarak, kazı türüne göre ise delme-patlatma ve mekanize kazı olarak sınıflandırılabilir.

Parçalı kesit tünel açma yöntemleri ayna kesitinin parçalara ayrılıp, tek tek kazıldığı yöntemlerdir. Parçalı kesit tünel açma yöntemleri olan Alman, Belçika,

İngiliz, İtalyan, Alman ve eski Avusturya yöntemi klasik yöntemler olarak da adlandırılmaktadır ve 19. yüzyılın son yarısına kadar kullanılmıştır. Bu yöntemlerde genellikle kazı elle ya da basit delme ekipmanlarıyla yapılır, ağaç (ahşap) tahkimat kullanılır ve kaplama ise tuğladandır. Bu yöntemler artık uygulanabilir olmasa da bazı prensipleri günümüze uyarlanmıştır. Avusturya tünel açma yöntemi ise tünelciliğe getirdiği yenilikler ve modern parçalı kesit yöntemi olarak kabul edilmesi sebebiyle en çok kullanılan tünel açma yöntemlerinden biridir. Yöntem, temelinde kazı sonrası oluşan deformasyonların denetlenip yönlendirilerek kayayı kayaya taşıtma prensibine dayanmaktadır.

Tam kesit tünel açma yöntemi kesitin parçalara ayrılmadan tek seferde kazıldığı yöntemlerdir. Gelişen teknoloji sayesinde tam mekanize tünel açma makineleri (TBM) yapılmıştır. Bu makineler tünel kesitini tek seferde kazmayı, pasayı nakliye etmeyi ve tahkimatı kurmayı tek başına yapabilmektedirler. Bazı durumlarda delme-patlatma ile de tam kesit ilerleme yapılabilir. Bazı durumlarda delme-patlatma ile de tam kesit ilerleme yapılabilir.

Aç-kapa tünel açma yöntemi sığ tüneller için yaygın kullanılan bir yöntemdir. Genellikle istasyon inşaatlarında kullanılır. Bu yöntem yarmanın kazılması, tünelin inşası ve oluşturulan tünelin üstünün zeminle örtülmesi aşamalarından oluşur.

Kazılar günümüzde delme-patlatma ile ya da mekanize olarak yapılmaktadır. Delme-patlatma ile yapılan kazılarda sırasıyla patlatma deliklerinin delinerek patlayıcı madde ile doldurulması, patlayıcı maddenin patlatılması, oluşan gazların tahliyesi, oluşan pasanın nakliyesi, sökülememiş kaya parçalarının sökülmesi, geçici tahkimatın kurulması ve son olarak havalandırma ve diğer donanımın ilerletilmesi adımları uygulanır (Heiniö, 1999). Mekanize kazıda ise kollu (bumlu) tünel açma makineleri (roadheader), darbeli tünel açma makineleri (hammer) ve tam kesit tünel açma makineleri (TBM) kullanılmaktadır.

Aşağıda bu yöntemler kısaca açıklanacaktır ancak bu çalışmanın içeriği sebebiyle Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi daha ayrıntılı ve ayrı olarak anlatılacaktır.

2.2.1 Tam Kesitli Yöntemler

Tünel ihtiyacının ve uzunluklarının artması sebebiyle, gelişen teknolojiden yararlanarak tam kesit tünel açma makineleri (TBM) yapılmıştır. Bu makineler tam dairesel olarak kazı yapmakla birlikte nakliyyeyi ve tahkimatı da kendileri yapmaktadırlar dolayısıyla çok hızlı bir yöntemdir. İlk yatırım yüksektir ancak sürekli ilerleme sağlaması ve işçilik, enerji, kaplama gibi maliyetleri düşük olduğu için uzun mesafelerde uygun olmaktadır.

Davranışı çok değişkenlik gösteren formasyonlar, tahkimatı ya da kazı için kullanılan kesici uçları değiştirmeyi gerektirebileceği için yeterli jeolojik veriye ihtiyaç duyulur. Kayacın tünel boyunca homojen olması, kayacın çok sert olmaması, su gelirinun yüksek olmaması ve yeterli miktarda kurulu elektrik gücünün olması gerekir.

Tam kesit tünel açma makineleri kesme, itme, tutunma, zemin kontrolü ve tahkimi, kaplama erektörü, pasa nakli, havalandırma ve güç kaynağı ünitelerinden oluşur. Kazı, döner bir kesici kafa üzerinde bulunan kesici uçlar ya da diskler ile yapılır. Kesici kafa üzerinde kesici elemanların yanı sıra pasayı toplamak için de kepçeler bulunur. Bu kepçeler pasayı bant konveyöre ileterek sistemin dışına çıkarılmasını sağlarlar. Yönlendirmeyi ve itmeyi sağlamak için kesici kafanın arkasında itme ve yönlendirme silindirleri bulunmaktadır. Kilitleme pabuçları (gripper), kesici kafayı döndüren motorlar ve beton tahkimat elemanları yerleştiren erektörler de bu kısımda yer almaktadır. TBM arkasında bulunan back-up sistemler olarak adlandırılan kısımda ise hidrolik güç üniteleri, elektrik trafoları, tavan cıvataları için bir delici, havalandırma fanları, pasa nakliyatı için bant konveyörler, vagonlar bulunmaktadır.

TBM'ler şildli ve şildsiz olarak ikiye ayrılırlar. TBM'lerde şild kullanımı, tünel aynasının kazısı sırasında oluşan boşluğun geçici ya da nihai tahkimat kuruluncaya kadar desteklenmesinin gerektiği durumlar için ortaya çıkmıştır. Şildli TBM'ler ayna destekleme yöntemlerine göre aşağıdaki gibi sıralanabilirler;

- **Tek Şildli TBM**
- **Çift Şildi TBM**
- **Açık Yüzeyli Şildler**
- **Basınçlı Hava Şildi**
- **Çamur Şildi (Slurry Machine)**
- **Arazi Basıncını Dengeleyen (EPB)**

2.2.2 Parça Kesitli Yöntemler

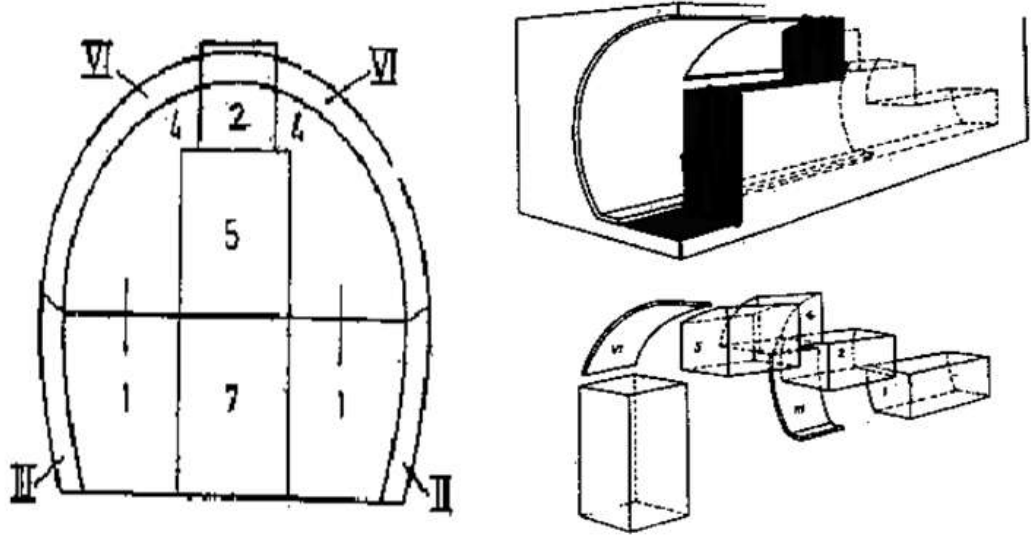
Parçalı kesit tünel açma yöntemleri ayna kesitinin parçalara ayrılıp, tek tek kazıldığı yöntemlerdir. Parçalı kesit tünel açma yöntemleri olan Alman, Belçika, İngiliz, İtalyan, Alman ve eski Avusturya yöntemi klasik yöntemler olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntemler aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

2.2.2.1 Alman Yöntemi

Bu yöntemde önce tavan galerisi ve iki adet yan ayak galerisi kazılıp, yan ayak galerilerinden tavan galerisine doğru birleştirilerek tünel boyunca galeriler açılır. Ortada bırakılan çekirdek denem bölümü sayesinde büyük deformasyonlar engellenmiş olur. Tavan kaplamaları yapılır ve son olarak çekirdek kısmı da kazılır. Çekirdek kısmı da alındıktan sonra taban kaplamasına geçilip tünel bitirilir.

Açılan galerilerin dar olması ve zaman kaybının fazla olması dezavantajlarıdır ayrıca galeri gerilmeleri değişik yön ve şiddette ortaya çıkabilmektedir. Ancak açılan galeriler formasyon özelliklerinin belirlenmesini sağlar dolayısıyla bilinen bir ortamda çalışılması bir avantajdır.

Önemini yitirmiş bir yöntem olsa da büyük kesitli tünellerin kalot kazılarında hala kullanılmaktadır.

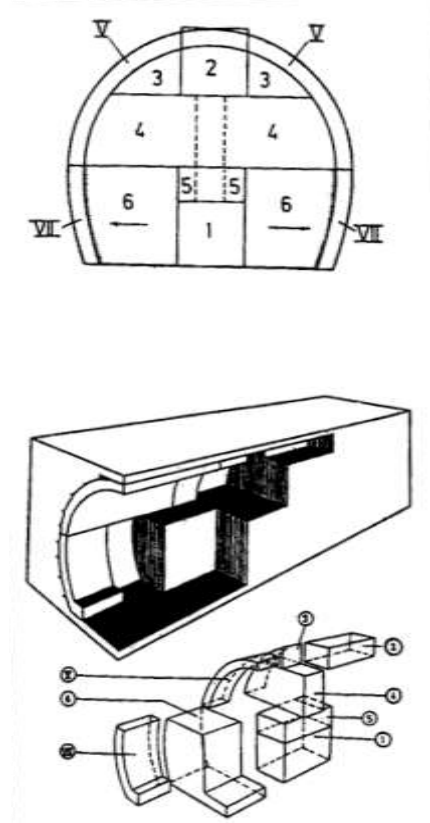


Şekil 2.1 Alman yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.2.2 Belçika Yöntemi

Bu yöntem, tavanda galeri sürülmesini takiben tavanın hemen kaplanması ve bunun sayesinde tavanın kısa zamanda sağlamlaştırılması temeline dayanmaktadır. Orta ve az sağlam kayalarda başarıyla uygulanabilmektedir. Çalışma alanının dar olması ve kaplamaların çabuk yapılmasının gerekliliği dezavantajlarıdır.

Bu yöntemde, tünel kesitinin büyük olması gibi durumlarda, gövdenin yanlarında bacalar açılıp beton ayakların dökülmesi gibi bazı değişiklikler yapılabilmektedir. Tavan ve taban galerileri bir bacayla birleştirilerek nakliyat galerisiyle sürekli irtibat sağlanır.



Şekil 2.2 Belçika yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.2.3 İtalyan Yöntemi

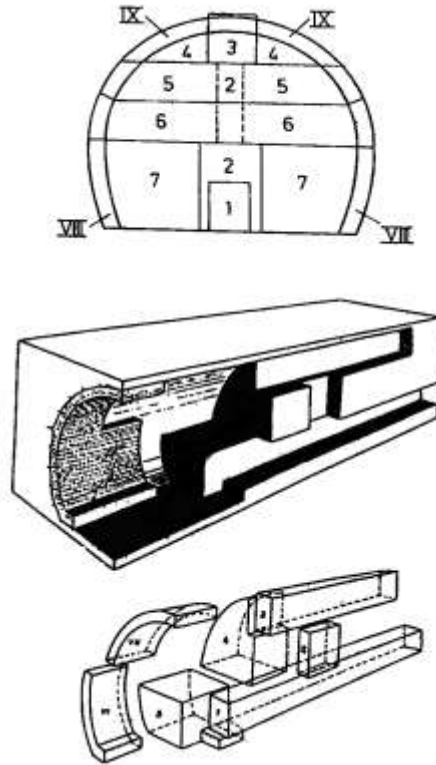
Çok az kullanılan bir yöntemdir ve çok plastik ve akışkan kayalarda tercih edilmektedir. Kazı öncesi, tünel cidarının rijit plakalarla kaplanması temeline dayanmaktadır. İlerleme çok yavaştır çünkü plakalar kazı sırasında kaldırılıp, sonrasında tekrar kaplanmaktadır.



Şekil 2.3 İtalyan yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.2.4 Eski Avusturya Yöntemi

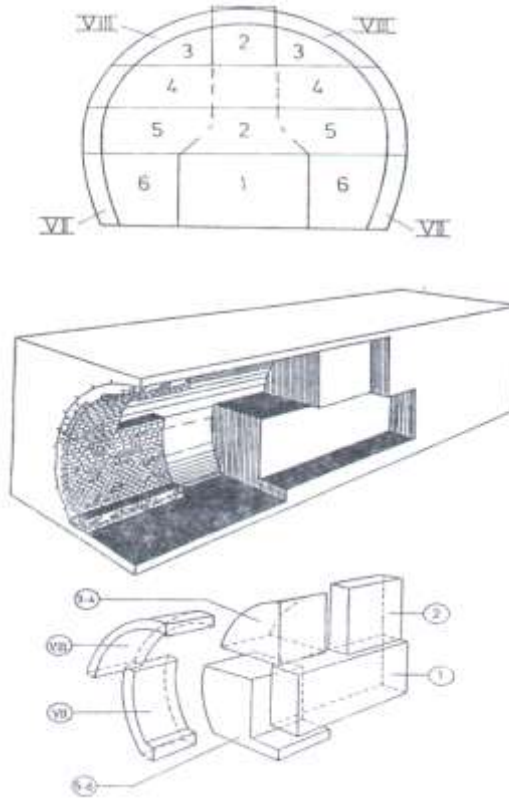
Bu yöntemde tavan ve taban galerileri açılır ve kazı yukarıdan aşağıya doğru yapılmaktadır. Tüm parçalar alınmadan kaplama yapılmamaktadır ve kaplama aşağıdan yukarı doğru yapılmaktadır.



Şekil 2.4 Eski Avusturya yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.2.5 İngiliz Yöntemi

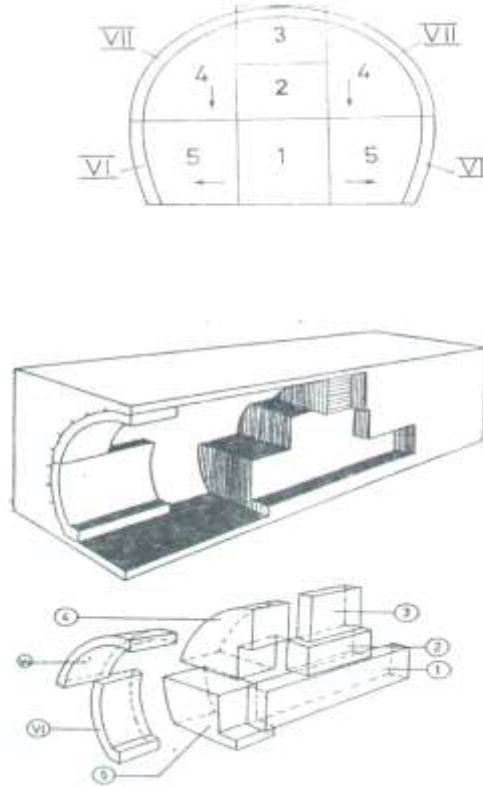
Eski Avusturya yöntemine çok benzer ancak daha sağlam ve az baskılı kayalarda uygulanır çünkü daha az parçalıdır.



Şekil.2.5 İngiliz yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.2.6 İsviçre Yöntemi

Bu yöntemde önce taban galerisi açılır ve nakliyat amacıyla kullanılır. Sonra bu taban galerisi tavana kadar genişletilir ve yan parçalar aşağıya doğru alınır. Kaplama aşağıdan yukarıya doğru yapılır.



Şekil 2.6 İsviçre yöntemi (Köse ve ark. 1992)

2.2.3 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)

Tünelciliğe yeni bir anlayış getiren "**Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)**" tünelin, içinde açıldığı kaya ortamına kendi kendini taşıtma ilkesine dayanır. Yöntemin prensibi, ilk olarak kazı ve sağlamlaştırma yönteminin seçilmesi ardından kazı sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların denetlenmesi, yönlendirilmesi ve boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sisteme dönüştürülmesidir. Yöntemde kayacın yük taşıma kapasitesi kullanılır hale getirilerek kayaç, yük oluşturulan ortamdan yük taşıyıcı ortama dönüştürülür (Köse ve ark., 2007).

NATM, 1958 yılında A. Brunner tarafından patentlenmiş ve 1959'da L.V. Rabcewicz tarafından tanıtılmıştır. Patent başvurusunda kullanılan tanım şöyledir: “İnce geçici bir destekleme yerleştirmek ve deformasyonlara izin vermek yoluyla kaya basıncının düşürülmesi ve bu basıncın çevreleyen kayaya dağıtılmasıdır.

Böylece son destekleme daha az yüklenecek ve daha sonra daha ince bir yapı halinde son destekleme yerleştirilebilecektir. Deformasyonlar ölçümler ile gözlenmeli ve sonuçlar yapısal analiz ve tasarım ile birlikte değerlendirilmelidir.” (Kahyaoğlu, 2008).

Rabcewicz yöntemin basitçe üç aşamada gerçekleştiğini söylemiştir;

1. İnce bir püskürtme beton uygulaması,
2. Tünel cidarındaki koruyucu halkanın mümkün olan en kısa sürede tamamlanması,
3. Sistematik deformasyon ölçümlerinin yapılması.

Bu yöntemde davranışı önceden bilinen ve tahmin edilen kayanın "ideal yenilme koşulu", yeraltı suyunun drenajı, aşırı örselenmeyi engelleme (patlayıcıdan olabildiğince kaçınma), gevşemeleri ve sökülmeleri önleme, zamanı yeterince kısa tutma gibi önlemlerle korunmalıdır. Kazı sonrasında oluşan "ikincil gerilme durumu", gerilme yoğunlaşmalarını engelleyecek yuvarlatılmış kazı yüzeyleri ile engellenmelidir. İkincil deformasyonlar gevşemelere izin vermeyecek kadar küçük, tünel cidarını plastikleştirilecek ve gerilme kemerini (Wiessman - Trompeter Zonu) dağın içerisine kaydıracak kadar büyük, zamanla sönmünecek kadar kontrollü tutulmalıdır (Vardar, 1982).

Kullanılan tahkimat sistemlerinin kullanılmasına bağlı olarak NATM'in kronolojik gelişimi Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 NATM'a götüren kronolojik gelişmeler (Karakuş ve Fowell, 2004)

| YILLAR | GELİŞMELER |
|-----------|---|
| 1811 | Brunel tarafından dairesel kalkanın (shield) keşfi |
| 1848 | Wejwanow tarafından hızlı priz alan harcı kullanmak için ilk girişim |
| 1872 | Rziha tarafından ağacın yerini çelik tahkimatın alması |
| 1908-1911 | Akeley'in tabanca püskürtme beton makinasını icadı |
| 1914 | Püskürtme betonun Denver'daki kömür madenlerinde ilk uygulandığı |
| 1948 | Rabcewicz tarafından çift-kaplama sisteminin tanıtılması |
| 1954 | Bruner tarafından tünellerdeki sıkışan zeminlerin stabilitesini sağlamak amacıyla püskürtme betonun kullanılması |
| 1955 | Rabcewicz'in Zemin ankrajlamayı geliştirmesi |
| 1960 | Müller tarafından sistematik ölçümlenin öneminin teşhis edilmesi |
| 1962 | Rabcewicz'in Yeni Avusturya Tünel Yöntemini Salzburg'daki bir dersinde tanıtması |
| 1964 | Rabcewicz'in yaptığı NATM'in İngilizce hali ilk defa literatürde görüldü |
| 1969 | Yumuşak zemindeki ilk kentsel NATM uygulaması. (Frankfurt am Main) |
| 1980 | Literatürdeki çelişkiler gereği ITA'nın (uluslararası tünelcilik birliği) Avusturya Ulusal Yeraltı İnşa Komitesi tarafından NATM'in yeniden tanımlanması |
| 1987 | Britanya'daki ilk NATM, Soar Madeni |

Leopold Müller NATM'in prensiplerini 22 maddede belirtmiştir. Bunlar;

- Kazı sonrası oluşan yükü taşıyan kayanın kendisidir.
- Açılan boşluğun çevresindeki kaya dayanımını kaybetmemelidir.
- Gevşemeler kayanın taşıma direncini azalttığından önlenmelidir.
- Tek ve iki eksenli gerilim ortamının önlenmesi dayanımı azalan kayayı korur.
- Koruyucu zon oluşurken dikkatli denetlenmeli ve yönlendirilmelidir.
- Tahkimat işleri ne erken ne geç yapılmalı, ayrıca esnekliği de çok iyi ayarlanmalıdır.
- Kayanın davranışı, koruyucu zonun oluşturulma zamanına oldukça bağlıdır. İksanın yapılacağı zaman çok iyi seçilmelidir.
- Özgül zaman faktörü, inşaat süresince yapılan konverjans ve deformasyon ölçümleri ve inşaat öncesi yapılan laboratuvar deneyleri ile saptanır. Kaya sınıflaması, kendini tutma süresi ve deformasyon oranı gibi çok önemli parametrelerin belirlenmesini sağlar.
- Kayaya püskürtme beton ve bulon uygulayarak yüzey bağlanır. Bu sayede kayanın sağlamlığı temin edilir.
- Sağlamlaştırma kaplamaları ince kabuk şeklinde ve gerekli esneklikte olmalıdır.

- Sağlamaştırma çelik hasır, ankraj ve çelik bağlarla yapılmalıdır. Sağlamaştırma, kabuğu kalınlaştırarak değil, gerekli esnekliğin verilmesi ve kayaya tutturulması sayesinde yapılır.
- Sağlamaştırma zamanı ve araçları ölçümlerle saptanmalıdır. Deformasyon ve gerilmelerin ölçülmesi, kayacın uygulama sırasındaki davranışının belirlenmesini sağlar.
- Taşıyıcı zon ile sağlamaştırma kabuğu birleşik bir halka oluşturmakta ve bu halka bir boru gibi davranmaktadır.
- Sağlamaştırma kabuğunun bir halka şeklinde olması çok önemlidir bu yüzden taban kazısı kalot, sağ ve sol yan kazılardan sonra bitirilmeli ve kaplaması yapılmalıdır.
- Tam kapanmamış bir çember kayanın plastikleşmesine yol açarak taşıma direncini düşürür.
- İksalanmamış kısımlar hep en kısıda tutulmalıdır.
- İlk iksa üzerine bir iç kabuk uygulanabilir. İç ve dış kabuk ince yapılarak burulma momentleri ve kırılmasının gelişmesi önlenir.
- İç ve dış kabuğun mukavemeti kalınlaştırarak değil desteklenerek artırılabilir. Bulonların sıkıştırılması ve uzatılması ile iksaya destek olunabilir.
- Yapım süreci içinde yönlendirme ve denetleme ölçümleri yapılmalıdır. Tüm sistemin duraylılığı ve emniyeti, sağlamaştırmanın gerekli olup olmadığı, tünel boyunca yapılan konverjans ve deformasyon ölçümleriyle anlaşılabilir.
- Kabukla kaya arasındaki gerilim ölçümleri dış kabuğun boyutlandırılmasında gereklidir.
- İkinci kabuğun görevi güvenliği arttırmak ve mimari görünümü sağlamaktır.
- Kaya yapısından kabuğa iletilen su basıncı drenajla boşaltılmalıdır. Bu sebeple boşluk çevresine drenaj boruları yerleştirilmelidir.

Patlayıcı ile açılan bir tünelin etrafında özellikle gevşek eklemli zeminlerde çentikli bir yüzey hattı oluşur. Püskürtme beton ilkin zayıf düzlemler boyunca olan kopmalarla meydana gelen köşe ve çukur bölgelere uygulanır. Bu bölgelerde oluşabilecek gerilme yoğunlaşmasını önlemek çok önemlidir. Püskürtme betonun

kazıdan hemen sonra tatbik edilmesi gerekir. Püskürtme beton içine yerleştirilen donatı, kesme kuvvetine ve bu kuvvetten kaynaklanacak momentlere dayanım göstermektedir.

NATM'da kaya bulonları birincil gerilme durumları değişmiş kayaçları arkadaki sağlam zemine tutturarak, kayaca taşıyıcılık vermek ve oluşan deformasyonları sınırlamak için kullanılır. Bu nedenle, kaya bulonlarının plakalarının tüm yüzeyi ile zemine oturması gerekmektedir. Aksi halde istenmeyen sonuçlar doğabilir. NATM'da değişik ikincil gerilmelerin ortaya çıkmasından kaçınmak için kazı, küçük parçalar halinde yapılır. Kazı genellikle üç aşamada gerçekleştirilir. Birinci aşama kazıya kalot denir. Tünel kesitinin üst yarısının, yarım daire şeklinde alınması ile gerçekleştirilir. İkinci aşama stros kazısıdır, kalot kazısının 25-30 m ilerlemesinin ardından kazılmaya başlanır. Bu aşamadan sonra üçüncü kademe kazı veya taban (radye) kazısı, ilk kademeyi takiben son olarak yapılır. Kazı aşamalarının sayısı, tünel boyutları, kayaç formasyonunun cinsi, deformasyon limitleri, sarsıntı (patlatma) limitleri, makine tipine vb. bağlı olarak değişebilmektedir (Şeker, 2008).

Yeni Avusturya tünel açma metodunun amacı, zemini stabilitesini muhafaza edecek tarzda kazmak ve takviye etmektir. Bu, alttan kazılan zeminin ağırlığını taşımayı amaçlayan çeşitli klasik tünel açma metotlarına tezat teşkil etmektedir. Tecrübeler, kazının tamamlanmasından uzun bir süre sonrasında dahi üstteki zeminde gevşemelerin devam ettiğini gösterdiğinden böyle bir destekleme genellikle çok masif olmaktadır. Tünel kaplaması, birkaç tünel çapı büyüklüğündeki hacme eşit bir ağırlığı taşıyacak şekilde boyutlandırılıyordu.

Kazı yüzeyindeki zemin parçacıklarını birbirine bağlamak için kazıdan sonra hemen bir ön beton tabakası tatbik edilir. Bu parçacıklar hareketsiz hale getirildikten sonra daha gerideki parçacıklar da hareket edemez, zemin stabilize edilmiş veya en azından kontrol altına alınmış olur.

İnce ve esnek bir kaplama oluşturmak için ilave püskürtme betonu ardı ardına tatbik edilir. Püskürtme beton kaplama kalınlığı klasik tünel kaplamasının kalınlığına

hiçbir zaman ulaşmayacaktır. Püskürtme betonun yapısal taşıyıcı bir kemer teşkil etmesi düşünülmemiş, ancak tünel çevresindeki kayma mukavemetine katkıda bulunması ve ayrışmayı önlemesi amaçlanmıştır.

Püskürtme beton kaplaması, zemin deformasyonlarına uyabilecek esneklikte olması, dengeye ulaşıncaya kadar artan bir mukavemet kazanması amaçlanmıştır. Kazı akabinde tatbik edilen rijit bir kabuk çatlamaya meyilli olacaktır.

Tünel tabanı da, tünel çevresinin üst kısımlarında olduğu gibi aynı zemin kuvvetlerine maruzdur. Tünel tabanı genelde takviyesiz olarak bırakılır. Zira tabandaki malzeme, ilerleyen gevşemeyi tutmaya yeterlidir. Plastik zeminde veya tünel tabanında kabarma veya tünelin alt kısımlarında deformasyonlar gözlemlendiğinde, erken bir püskürtme beton taban inşası, tünel üst çevresinde oluşturulacak bir erken püskürtme beton tatbikatı kadar önemlidir.

Ön ve nihai kaplama kalınlıkları, bir jeoteknik analiz sonucunda belirlenmelidir. Birçok durumda, böyle bir hesap için yeterli jeoteknik veri üretmenin mümkün olmaması nedeniyle hesaplar daha çok kabuller ve tecrübelerle dayandırılmaktadırlar. Buna bağlı olarak, tünel inşaatı sırasında zeminde ve ilk kaplamada oluşan deformasyonların ölçülmesi bir NATM uygulamasıdır. Şiddetli deformasyonlar bazen çalışma yöntemlerinin değiştirilmesi ile nötralize edilebilir veya karşılaşılan zemin durumlarına göre ilk ve bazen de son kat kaplamalarda değişiklikler de yapılabilir.

Kırıcı ile yeni açılmış tünel etrafındaki duvarlar, kırılma öncelikle eklenen veya yapraklanma düzlemleri boyunca olduğundan, gevşek eklemli zeminlerde çentikli bir yüzey hattı arz eder. Püskürtme betonu öncelikle, zayıf düzlemler boyunca olan kopmalarla meydana gelen köşe ve çukurluklara, bu yerlerde oluşan gerilme konsantrasyonuna mukavemet sağlamak üzere tatbik edilir. Sert blokların uçlarının kaplanmaması veya ince olarak kaplanmış olması önem taşımaz. Püskürtme beton, tünel çevresini yumuşak ve sürekli bir eğriye dönüştürmesi halinde en etkilidir.

Püskürtme beton tatbikatının zamanlaması önemlidir. İlk tabakanın kazıdan sonra hemen tatbik edilmesi gerekmesine rağmen, püskürtme betonun mukavemeti artarken zemindeki deformasyonun azalan bir hızda oluşmasına izin vermek için günlük veya haftalık aralıklarla ilave tabakalar tatbik edilmelidir.

Aynı merkezli zemin deformasyonları tünel çevresinin kısılmasına neden olur. Bu kısıalma tünel çevresi etrafındaki zemin kütlelerinde tavanın gevşemesine veya eklem düzlemleri boyunca harekete olan kayma gerilmelerini doğurur. Püskürtme betonu, zemin yüzeyinin kayma mukavemetini artırarak bu gevşemenin önlenmesi amaçlanmıştır. Kuvvetlerin bir ortamdan diğerine aktarılabilmesi için sonuçta zemini ile püskürtme beton kaplaması arasında sağlam bir aderans oluşmalıdır.

Püskürtme betona gömülen hasır çeliğin asıl fonksiyonu gevşek malzemenin tutulması ve sıva çıtası işlevi görmesi değil püskürtme beton kaplamanın kesme mukavemetini artırmasıdır.

Klasik tünelticilikte, kaya bulonları gevşek haldeki dilim veya bulonları durdurma için kullanılır. NATM'a göre ise, kaya bulonları tünel çevresi arkasındaki zeminin kayma mukavemetini artırma amacı ile kullanılır. Bu nedenle kaya bulonlarının sadece uçlarından ankrajlanıp bırakılmaması zemine tünel boyunca aderansı gerekir.

Klasik tünelticilik çelik iksaları zeminde inşa edildikleri yerlerde nokta yüklere maruz kalan yapısal kemerler olarak düşünülmektedir. NATM yönteminde ise çelik iksaların asıl işlevi püskürtme betonun kesme donatısı olmalarıdır. Bu nedenle, gerilmelerin tam olarak aktarılmasını sağlamak ve iksanın yanal burkulmasını önlemek için çelik iksaların püskürtme betona tam olarak gömülmesi gerekir. Bu tecrübeyle de sabittir. Çelik iksalar genelde eğilme ile değil daha zayıf eksenleri boyunca plastik mafsal oluştururken eksenel basınçla kırılırlar.

2.3 Tünel İnşaatlarında Zemin İyileştirme

2.3.1 Tanım ve Yöntemler

Kentsel ya da kırsal bölgede olsun zayıf zeminlerde tünel açarken çeşitli problemlerle karşılaşılmaktadır. Kentsel bölgelerde tüneller genellikle sığ ve deformasyon istenmeyen tünellerdir. Zayıf zeminler, yüzey yapılarında oldukça fazla hasara sebep olabilir. Kırsal bölgelerdeki tünellerde ise bazen kazılan açıklığın stabilitesini sağlamak ve deformasyonları sınırlamak oldukça zordur. İşte böyle durumlarda inşaat öncesi zemin/kaya özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Zemin iyileştirme çalışmalarıyla yüzey oturmalarının azaltılması, yüzey oturma dağılımlarının kontrol edilmesi, konverjansların düşürülmesi, tünel aynasının stabilitesinin sağlanması ve yer altı suyunun tünele etkisinin önlenmesi hedeflenir.

Tünel inşaatlarında kullanılan başlıca iyileştirme yöntemleri şunlardır;

- *SERBEST ENJEKSİYON*; kimyasal bir karışımla hazırlanan malzemenin, zeminde/kayada delikler açılarak belli bir basınçla, boşluk veya çatlakları doldurarak taşıma gücünü artırma işlemidir. Genellikle geçirimsizlik amacıyla kullanılır.
- *JET-GROUTING*; zank kıvamındaki çimentonun yüksek basınçlı pompayla zemine enjekte edilmesi işlemidir. Zeminle bütünleşen kolonlar oluşturulmuş olur.
- *ÖNSÜREN*; kazı başlamadan önce, kazı çevresini ve aynasını düzensizliklerden korumak için yapılır. Tünel üst yarısı boyunca açılan deliklerden çelik borular sokulur ve bu delikli borulara enjeksiyon yapılarak boşluk kalmaması sağlanmış olur.
- *ZEMİN DONATILAMA*; ortama çekme direnci kazandırmak amacıyla zemine/kayaya yerleştirilen ankraj, bulon ve çivilerdir.
- *ZEMİN DONDURMA*; yer altı su seviyesinin altında yapılan çalışmalarda suyun olumsuz etkilerinden korunabilmek için suyun dondurulması prensibine dayanır..
- *DRENAJ*; tünelcilikteki en önemli sorunlardan biri olan yer altı suyunun ortamdaki uzaklaştırılmasıdır.

- *SIKIŞTIRMA*; zemin tanelerinin içindeki havanın uzaklaştırılmasıyla sıkışma yaratmaktır.

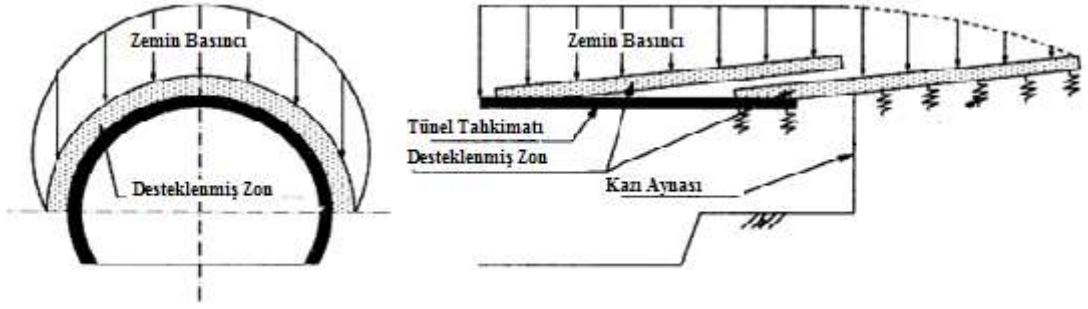
Bu çalışmanın kapsamında Çelik Boru Kemer Yöntemi iyileştirme çalışması olarak işlenmiş ve bu iyileşmelerin anlaşılabilmesi için sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmiş ve analizleri yapılmıştır.

2.3.2 Çelik Boru Kemer Yöntemi (Umbrella Arch Method)

Yerleşim bölgelerinde açılan sığ tünellerde, yüzey oturmalarının minimum seviyede olması gerekmektedir. Diğer tünellerden farklı olarak bu tip tünellerde sadece tünelin stabilitesi değil, çevre yapıların olumsuz etkilenmemesini sağlamak önemlidir. Çelik boru kemer yöntemi bu durumları önlemek için geliştirilmiştir.

Birçok araştırmacı Çelik Boru Kemer Yöntemi (UA) üzerinde araştırmalar yapmış ve farklı isimlendirmelerle de olsa bu yöntemi geliştirmişlerdir (Barisone ve ark., 1982; Leca ve Domieux, 1990; Oreste ve Peila, 1998; Gribbs ve ark., 2002; Miura, 2003; Volkman ve Shubert, 2006; Wang ve Jia, 2009).

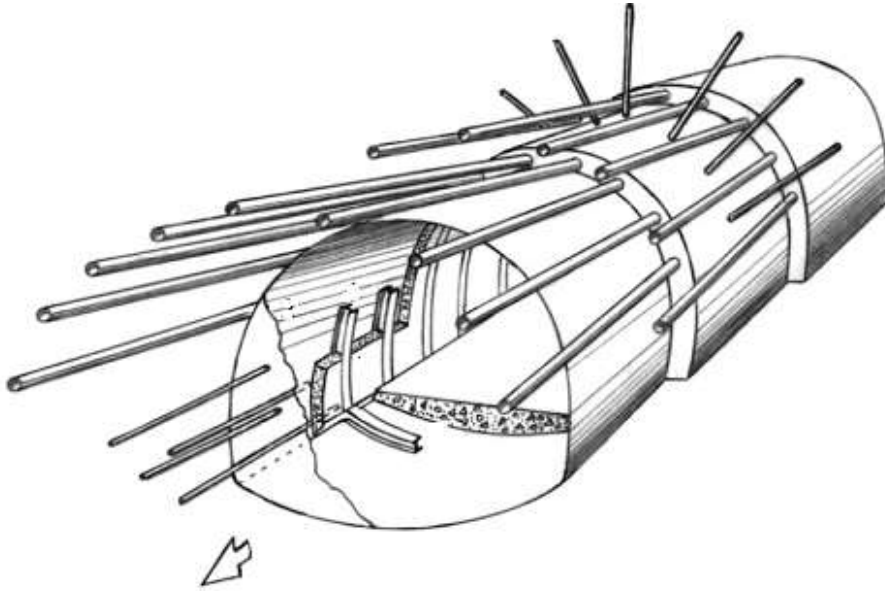
Çelik boru kemer yöntemi, kazı başlamadan önce kazı aynasının önüne uygulanan bir zemin destekleme tekniğidir. Bu yöntemin amacı tünel aynası ve çevresini mümkün olduğunca stabil tutmaktır. Bu yöntemde, aynanın üstünde bir yapay kabuk oluşturularak tünel kazısının hızlıca ve güvenli olarak yapılmasına olanak sağlayacak, şemsiye benzeri bir yapı oluşturulur. Boru kemer yönteminin tahkim etme kabiliyeti, aynayı hem enlemesine hem uzunlamasına yönlerde stabilize etmesinden kaynaklanır. Aynaya gelen yükler ve çelik boru kemerin davranışı Şekil 2.7' de görülmektedir.



Şekil 2.7 Çelik boru kemer yönteminin destekleme mekanizmasının şeması (Geo-Fortune Research Association, 1994)

Bu yöntem sayesinde ayna stabilitesi artmakta dolayısıyla zemin oturmaları sınırlanmakta, tünel tahkimatlarının boyutları azalmakta ve ayna yüzeyi genişletilerek daha büyük makinelerin kullanılmasına imkan sağlanmaktadır.

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, tünel cidarında belirli uzunlukta ve düşük eğimle (5^0 - 10^0) delinen deliklerin içine belirli çapta ve içi boş çelik borular sokulmaktadır. Daha sonra bu boruların içine enjeksiyon pompalanarak delik ile donatılar arasında boşluk kalmaması sağlanır.



Şekil 2.8 Çelik boru kemer uygulaması (Hoek, 2001)

Yöntemin uygulanış adımları şu şekilde gerçekleşir;

- Boru deliklerinin delinmesi
- Boruların yerleştirilmesi
- Boru ağzlarının enjeksiyon manşonuyla kapatılıp, etrafının yalıtılması
- Borulara enjeksiyon yapılması şeklindedir.

Genellikle 4 inch (114mm) çapında olan boruların deliklerinin delinebilmesi için özel delme makineleri kullanılmaktadır (Şekil 2.9 ve 2.10). Daha sonra bu deliklere boruların yerleştirilmesi için de yine aynı makineler kullanılmaktadır. Bu borulara da bazı özel işlemler yapılmaktadır. Bunlar; boruların deliklere kolayca çakılabilmesi için uçlarının daraltılması (Şekil 2.11) ve üzerine delikler açılması işlemleridir (Şekil 2.12).



Şekil 2.9 4 inçlik boru deliklerinin delinebilmesi için kullanılan makine



Şekil 2.10 4 inçlik delikler için delici uçlar

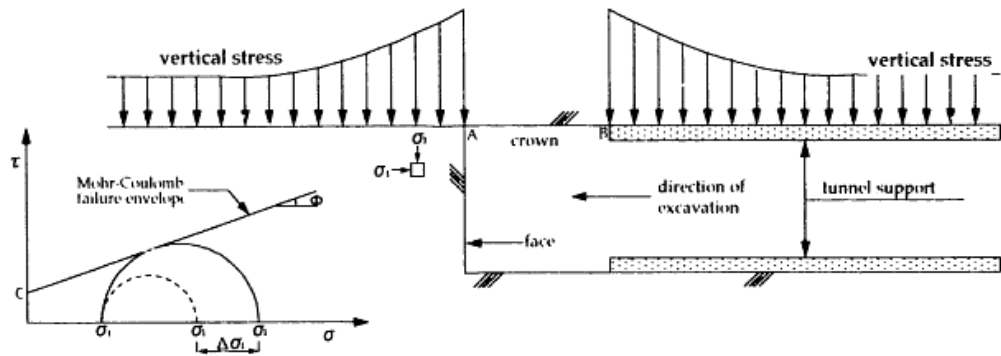


Şekil 2.11 Çelik boruların ucunun daraltılması işlemi

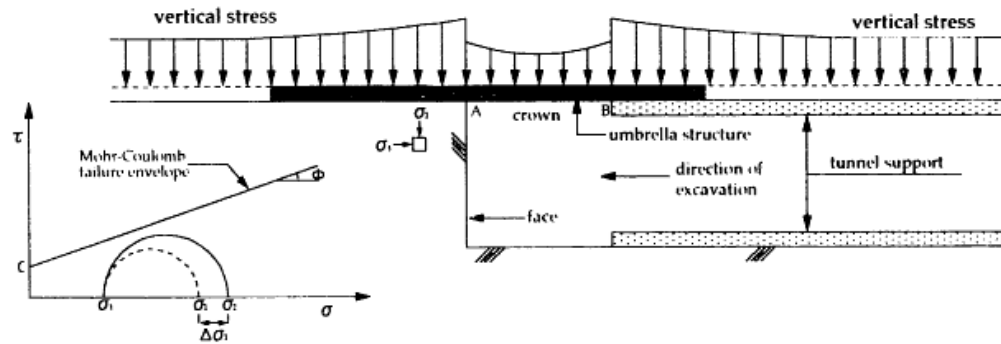


Şekil 2.12 Çelik boruların son hali

(a) Case in which the umbrella method is not employed



(b) Case in which the umbrella method is employed



Şekil 2.13 Ayna yüzeyindeki gerilme ve tünel tavanında uzunlamasına bir hat boyunca dikey gerilme dağılımı (Muraki, 1997)

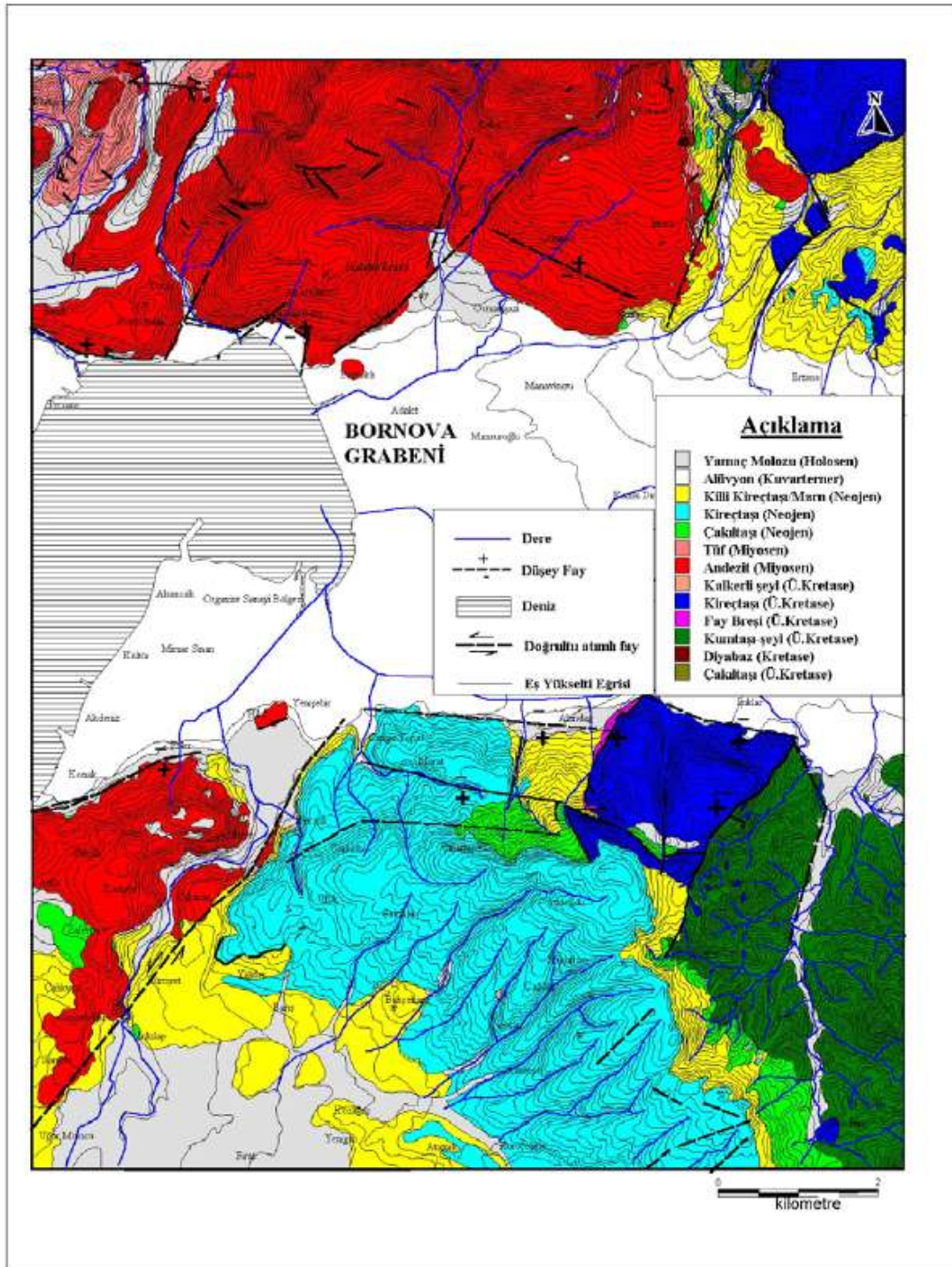
BÖLÜM ÜÇ

İNCELEME ALANININ GENEL JEOLJİSİ VE MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ

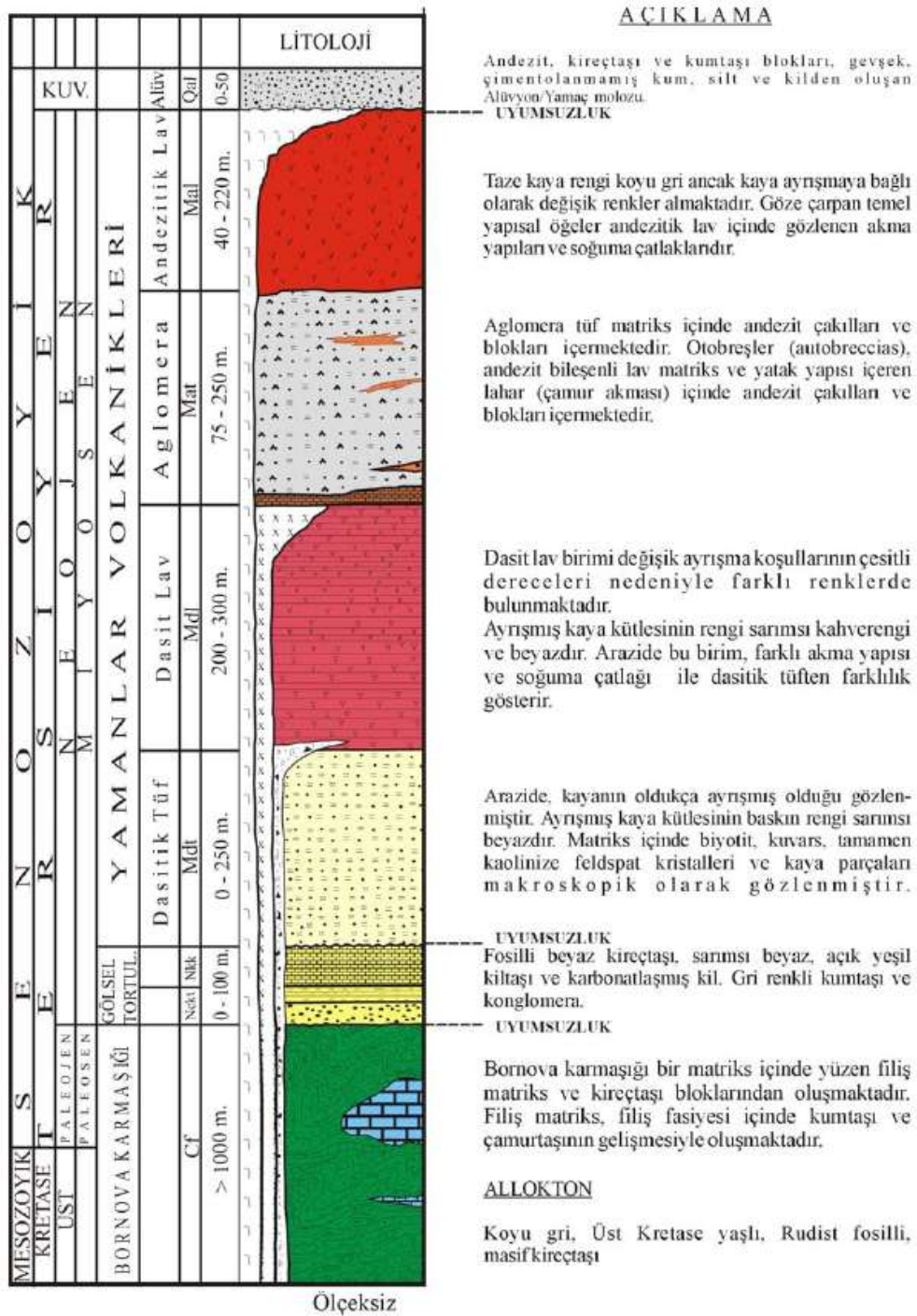
3.1 Genel Jeoloji

İzmir ve yöresinde temeli, Üst Kretase yaşlı Bornova Melanjı oluşturmaktadır. Melanjın matriksinden daha yaşlı kireçtaşı mega-olistolitleri Bornova Melanjı'nın matriksi içinde gelişigüzel bir düzen içinde bulunurlar. Bahsedilen kireçtaşları, Altındağ ve yöresinde Işıklar kireçtaşı olarak bilinmektedir.(Özer ve İrtem, 1982). Bornova Melanjı (karmaşığı), kumtaşı/şeyl-kalkerli şeyl ar dalanmasından oluşmuş matriks içerisinde yüzen platform türü kireçtaşı ve diyabaz bloklarından ve çakıltası mercek/kanal dolgularından meydana gelmiştir (Erdoğan, 1990). Neojen yaşlı göl sel tortullar Bornova Melanjı'nın üzerine açıs al uyumsuz olarak gelmektedir. Yamanlar volkanitleri de mevcut birimleri uyumsuz olarak örter. Kuvaterner yaşlı alüvyon ise incelenen alanda mevcut tüm birimleri uyumsuz olarak üstlemektedir (Şekil 3.1 ve 3.2)

Çalışma alanının temel kayasını Bornova Karmaşığı oluşturmaktadır. Bornova karmaşığı'nın matriksini oluşturan kumtaşı-şeyl ar dalanması, sarımsı kahverengi, grimsi kahverengi renk tonlarına sahip, düşük-orta dayanımlı, orta ve ince katmanlı ve bol çatlaklı kaya özelliğine sahiptir. Kireçtaşları, açık ve koyu gri, orta-yüksek dayanımlı, bol çatlaklı, orta-kalın katmanlı ve yer yer masiftir. Karmaşığın içerisindeki çakıl taşları kahverengimsi siyah renkli, orta-kalın katmanlı, kumtaşı ve kireçtaşı çakıllarından oluşan, ara madde veya tane destekli bir dokuya sahip olup, orta dayanımlıdır. Bornova Karmaşığı çökeliminin hemen sonrasında gelişen tektonizmanın etkisiyle şiddetli deforme olmuş ve ilksel yapısını kaybetmiştir (Erdoğan, 1990).



Şekil 3.1 İnceleme alanına ait jeoloji haritası (Kıncal, 2005)



Şekil 3.2 İzmir içi çevresinin genelleştirilmiş litostratigrafik kolon kesiti (Kıncal, 2005)

Bornova Karmaşığı'nı, yersel değişen kalınlıklara sahip Neojen yaşlı kırıntılı karbonatlı gölsel tortul kayaları; çakıl taşı, killi kireçtaşı/marn ve kireçtaşından oluşan istif uyumsuz olarak üstler. Gölsel tortullardan çakıl taşı; bölgedeki Üst

Kretase-Paleosen yaşlı Bornova Karmaşığı'nın çakıllarından oluşmuştur. Orta ince katmanlı, orta dayanımlı ve ara madde destekli bir yapıya sahiptir. Kireçtaşları ise beyaz renkli, orta-ince katmanlı, dayanımlı yer yer silisifiye olmuş, bol miktarda saz ve Gastropod fosilleri içermektedir. Killi kireçtaşı/marn ise sarımsı beyaz renkli, ince katmanlı dayanımsızdır. Genelde katmanların eğim açıları 5 - 20° arasında değişmektedir. Ondülasyonlu bir yapı sunmaktadır. Gölsel tortulların yaşı, killi kireçtaşı/marn ve kireçtaşları içerisinde gözlenen Gastropod ve saz fosillerine dayanarak Neojen olarak verilmiştir. Gölsel Neojen tortulların katmanlarının konumları genelde yatay ve yataya yakındır (Onargan ve ark. 2008).

Marn, inceleme alanında Evka-4, M.T.A., Bornova, Evka-3 civarında yüzlekler vermektedir. Düşük kotlardaki vadi tabanlarına yakın kesimlerde birim, ayrılmış ve çoğu kez kil haline dönüşmüştür. Killi kireçtaşı/marn üst kotlarda beyaz, sarımsı beyaz, çakıl taşı dokanağına yakın kesimlerde ise yeşilimsi renklere gözlenmektedir. Genellikle, ufalanabilen zayıf kayaç özelliğindeki marnlar, lamine ve/veya ince katmanlıdır. Bazı yerlerde ayrışmanın etkisiyle marnların kil ile sarılı bir durumda yumrulu bir yapı sunduğu gözlenmiştir. Killi kireçtaşı/marn'ın alt dokanağı çakıl taşı ile, üst dokanakları ise silisifiye kireçtaşı ile uyumludur. Katman eğim yönleri genellikle, güneydoğuya olup, çakıl taşlarında olduğu gibi ondülasyondan dolayı daha değişik yönlerde de olabilmektedir (Onargan ve ark. 2008).

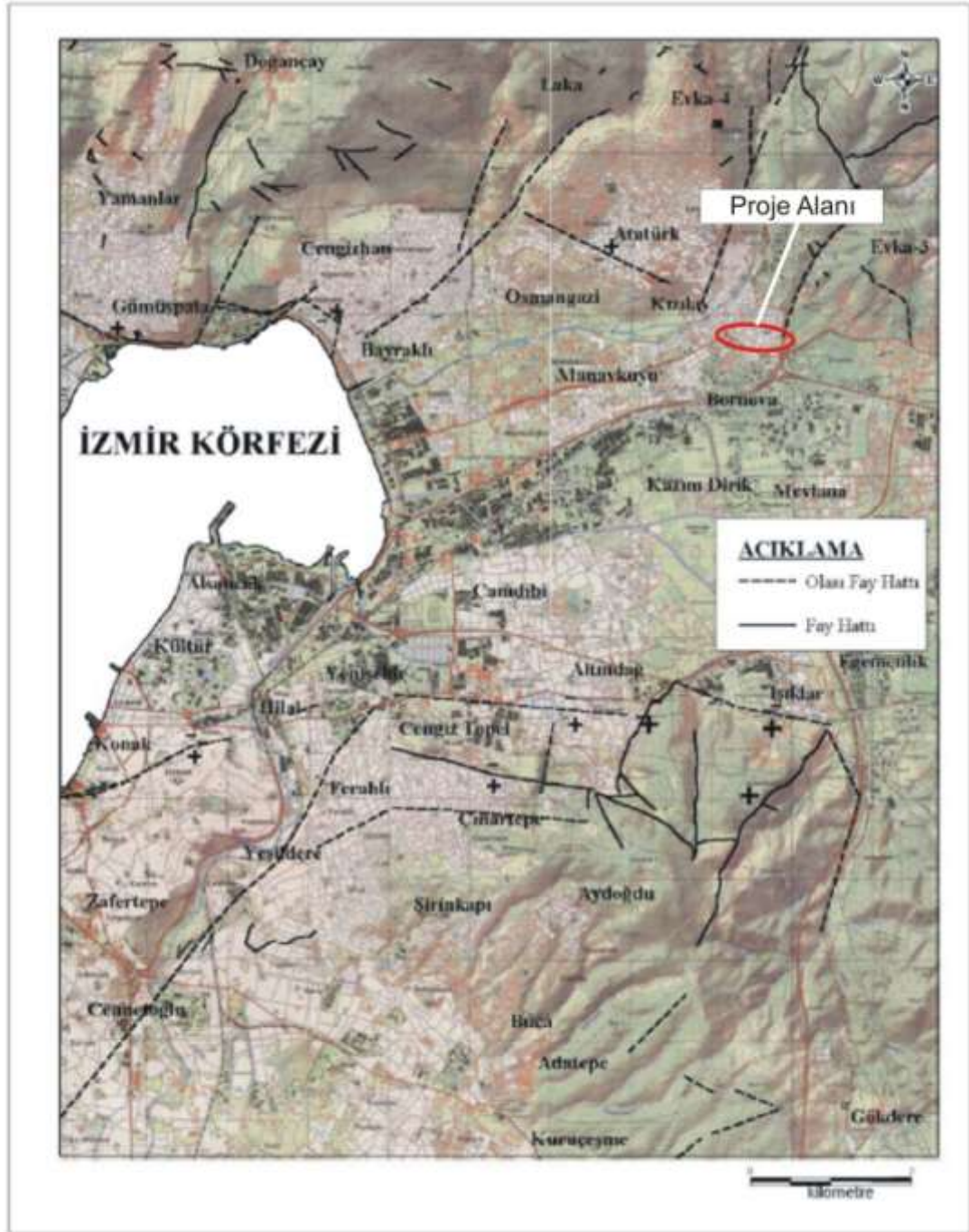
İnceleme alanını çevreleyen ana dereler boyunca ve ana derelere dik konumda bulunan küçük dereler boyunca yamaç molozlarını görmek mümkündür. Yamaç molozları, arazi genelinde, temel kayalardan türeme blok ve çakılların silt ve kil içerikli olarak kum matriks içinde bulunduğu bir malzeme özelliği sunmaktadır. Bu zeminin özelliği, üzerinde bulunduğu ana kayanın özelliklerine göre değişmektedir. Marnlar üzerinde yer alan yamaç molozlarının matriksi silt-kil içerikliken, çakıl taşlarının üzerinde yer alanların matriksi ince-orta kum boyutuna sahip malzemelerden oluşmaktadır. Alüvyon tabakasındaki zeminin lokasyona göre çakıl-kum-silt-kil içeriği açısından zemin özellik dağılım sınırları da Şekil 3.3 te önceki çalışmalarda üretilmiş alüviyal jeomorfoloji haritasında gösterilmiştir. Burada

aşınma yüzeyleriyle ayrılmışlardır; komşu yükseltiler üzerine transgressif aşmalıdır (Onargan ve ark. 2008).

Neojen istifini oluşturan tortul ve volkanik topluluğunun büyük alt bölümü Foça çöküntüsü, en üst bölümü Foça ve Akhisar çöküntülerinde gelişmiştir. KD – K (Miosen – Pliosen), KB – BKB (Miosen – Pliosen) ve BKB – B (Pliosen – Kuvaterner) gidişli yapısal – stratigrafik sistemler arasında bir derecelenmenin bulunmayışı oluşumların değişik sürücü kuvvetlere bağlı olduğunu yansıtır. Neojen’de orta doğu Ege çöküntüsü KD- K gidişli çizgisellik taşıyan özgül bir rift sisteminden yapıldır. Kuvaterner’de su üstü ve su altı tortullaşmasına, yaşıt biçim değiştirmeler, yapı ve morfoloji açınımları, Neojen’den kalıtsal oynak çizgilerin ve basamak bölümlerinin kontrolü altındadır. Çöküntü alanı jeofiziksel verilere göre rift niteliğini korur. Orta doğu Ege çöküntüsünde KD ve K gidişli çizgisel çöküntü ve yükselti basamaklarının birleşim yerleri oynak çizgileri oluştururlar. Bu yerler çok katlı ve değişik yönlerde yer değiştirmiş fay veya blok eğimlenme eksenleri ile simgelenir. Batı Anadolu’da, İzmir çevresinde üç tektonik kuşak yer almaktadır. Bu kuşaklar doğudan batıya doğru, Menderes Masifi, İzmir – Ankara Zonu ve Karaburun Kuşağı’dır. Menderes Masifi, en üst düzeyleri Alt Eosen’e kadar çıkan metamorfik kayalardan oluşmuştur. Menderes Masifi üzerine bindirmiş olan İzmir – Ankara Zonu, Manisa’dan Seferihisar’a kadar uzanan geniş bir bölgede Kampaniyen – Daniyen yaşında olan filiş fasiyesinde çökemiş tortul kayalar ve mafik volkanik ara katkılardan yapılmış bir matriks ve matriks içinde yüzen, boyları 20 km’yi aşan kireçtaşı bloklarından oluşmuş bir birim ile temsil edilir. Bornova Karmaşığı adı verilen bu birimin, matriksinin çökelişi sırasında kireçtaşı blok ve mega blokları 68 tortullaşma ortamına taşınmış ve bunun sonucu blokların çevresinde yumuşak sediment deformasyonları gözlenen karmaşık dokanak yapıları gelişmiştir. Bu kireçtaşı mega bloklarının eksikli ölçülen kesitlerinin birleştirilmesiyle elde edilen genelleştirilmiş stratigrafisi, Karaburun Yarımadası’nda yüzeylenen karbonat istifine benzerdir (Erdoğan, 1990). Orta – Üst Miyosen’de başlayıp günümüze kadar devam eden ve Batı Anadolu’daki grabenleri oluşturmuş doğu batı uzanımlı neotektonik yapılar, eski tektonik kuşakları kesmiş ve parçalamıştır. Graben tektoniği, paleotektonik kuşakları tanımlayacak ölçüde birbirinden ayırmasa da çöküntü

alanlarını dolduran tortul dolgu, birçok yerde bu sınırları örterek gizlemiştir (Onargan ve ark. 2008).

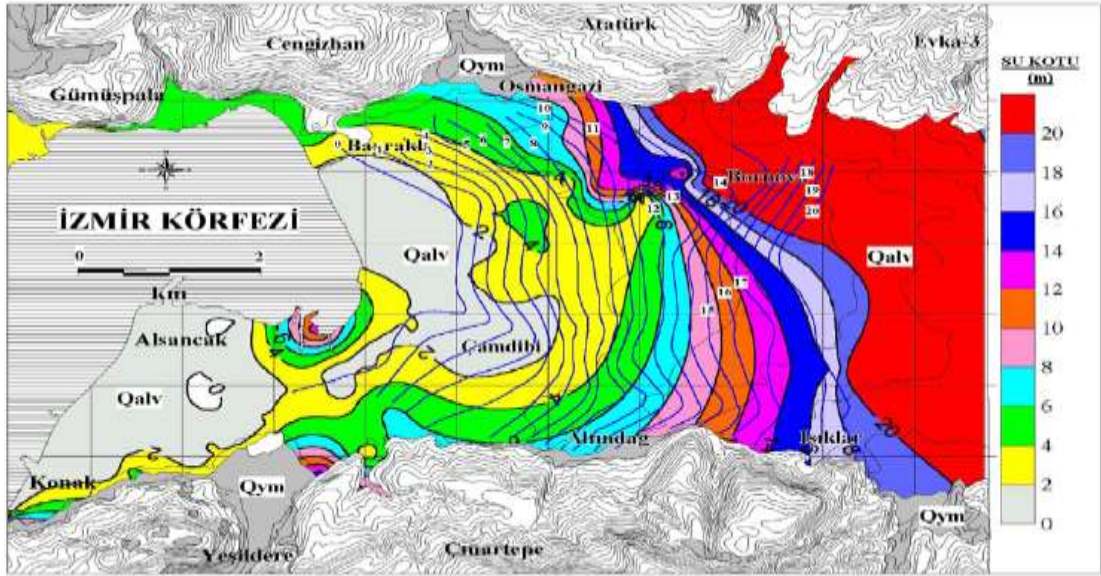
Özellikle Karaburun Kuşağı ile İzmir – Ankara Zonu'nun arasındaki ilişkiyi, birkaç sınırlı alan dışında, Neojen tortullar örtmektedir (Erdoğan, 1990). Bölgede Alpin Orojenezi'nin etkileri görülür. Bu saha Vallakien Fazı ile duyarlılık kazanmıştır. Kretase, filiş fasiyesinde tortullar ile temsil edilmiştir. Bu ise çökme ortamı dibinin dengede olmadığını gösterir ve periyodik osilasyonlar ile çakıtaşı - kumtaşı - marn ve kireçtaşı kayaçlarının karışımından oluşmuştur. Ancak, Kretase sonunda, kireçtaşlarının büyük kalınlıkta olması, derin denizin uzun süre devamlılığını göstermektedir. Kretase çökellerinde genel tabaka doğrultusu K – G ve 20 ve 60 derece batıya eğilidir. Kretase ile Miyosen arasında önemli bir boşluktan sonra, Miyosen sığ göl tortulları ile başlar. Göl tedricen derinleşerek, karasal fasiyesteki tortulları meydana getirmiştir. Miyosen devrinde geniş alanlar kaplayan volkanik tüfler, orojenik hareketler sonucu K – G yönünde meydana gelen çatlaklar boyunca çıkmıştır. Pliyosen tortulları, Miyosen tortulları üzerine diskordan olarak gelir (Erdoğan, 1990). Bu da, iki devir arasında Rodanien fazındaki hareketlerin etkisini göstermektedir. Pliyosen'de de hareketlerin devam etmesi, çapraz tabakalaşmayı oluşturmuştur. Deniz kenarlarında ve vadilerde görülen taraçalar, hareketlerin Kuvaterner'de de devam ettiğini göstermektedir. Şekil 3.4.'te görülen çizgisellikler, hem önceden belirlenmiş faylar üzerindeki çalışmalardan ve hem de arazi kontrolsüz uzaktan algılama yapılarak çizilmiştir. İzmir ve yöresinde KD-GB, K - G ve D-B ağırlıklı fay hatlarının varlığı dikkati çeker. Bu fay takımları kendi içerisinde incelendiğinde, yaklaşık D-B doğrultulu olan fay hatlarının diğer takımları kestiği söylenebilir. KD-GB uzanımına sahip, büyük fay hatları (Tuzla fayı) genellikle doğrultu atımlı fay karakteri gösteren, Oblik atımlı faylara işaret etmektedir (Onargan ve ark. 2008).



Şekil 3.4 Gölgeleştirilmiş arazi modeli ve fay hatları veri katmanının çakıştırılmış görüntüsü (Kıncal, 2005)

Yüksel Proje tarafından hazırlanmış olan **“İzray İzmir Hafif Raylı Sistemi 2. Aşama(1. Kısım) Ön Jeoteknik Değerlendirme Raporu”** başlıklı çalışma kapsamında açılan sondajlarda tünel güzergahı ve diğer aç-kapa, u-kesit inşaat kazı kotları altında yeraltı su seviyeleri tespit edilmiştir. Bu proje kapsamında açılan 10

adet sondaj çalışmasında da sondajların son metrajına kadar yeraltı suyu varlığına rastlanılmamıştır. Şekil 3.5'te 1967 ile 1990-2004 yılları arasındaki verilere göre hazırlanmış olan yeraltı su kotu haritasında da görüleceği üzere tünel güzergahı civarında yeraltı suyu seviyesi 20 metrenin altında görülmektedir. Yeraltı su seviyesinin belirlenmesine yönelik olarak yapılan incelemeler sonucunda önceki çalışmalar kapsamında yapılan sondaj verileri ve bu çalışma kapsamında yapılan sondaj verileri değerlendirildiğinde, yeraltı su seviyesi kotunun planlanan “**ray kotu**” nun altında olduğu görülmektedir. Geçilen formasyonların çakıllı, siltli-killi içerikli ve bol çatlaklı olması, tamamen ve-veya çok ayrılmış özellikte olması nedeniyle yeraltı şebeke kaçaklarından gelebilecek sularında dikkate alınması sonucu yeraltı su gelirinin çatlaklar ile kontrol edileceği varsayılarak kazı sırasında uygun drenaj önlemlerinin alınmasında yarar görülmektedir (Onargan ve ark. 2008).



Şekil 3.5 1967 ve 1990-2004 tarihli haritalarının üst-üste örtüştürülmesi ile elde edilmiş yeraltı su kotu haritası (Kıncal 2005)

3.2 Tünel Güzergahı Boyunca Karşılaşılması Olası Jeolojik Birimler ve Mühendislik Özellikleri

Yeryüzünden tünel ray kotunun altına kadar güzergah boyunca karşılaşılabilecek olan birimler mühendislik özellikleri ile birlikte aşağıda verilmiştir.

Dolgu tabakası; Kazı alanında bazı lokasyonlarda en üstte 1,70-3,00 metre kalınlığında dolgu tabakası yer almaktadır. Dolgu tabakasının birim hacim ağırlığı $0,018 \text{ MN/m}^3$, kohezyonu $0,077 \text{ MPa}$, içsel sürtünme açısı ise 14° kabul edilmiştir (Onargan ve ark. 2008).

Alüvyon (Qal); tünel güzergahı boyunca karşılaşılan alüvyon çökeller genelde Killi Kumlu Çakıl, Qal (g) birimlerini oluşturmaktadır. Tünel güzergahı boyunca tünel üstündeki egemen zemin birimlerini oluşturan **Killi Kumlu Çakıl**; bej-açık kahve renkli, çok sıkı, ince-iri taneli, nemli ve % 50 ye varan oranda iri çakıl ve blok içermektedir (Tablo 3.1).

Tablo 3.1 Killi Kumlu Çakıl birimine ait zemin parametreleri ve değerleri

| Zemin Parametreleri | Değer ve Aralık |
|----------------------------------|---------------------------------|
| Doğal Su İçeriği, W_n | % 9 ($5 \leq W_n \leq 16$) |
| Plastik Limit (PL) | NP |
| 4 no'lu elekte kalan | % 46 ($23 \leq \#4 \leq 79$) |
| 200 no'lu elekten geçen | % 17 ($0 \leq \#200 \leq 31$) |
| Birleştirilmiş zemin sınıflaması | GP, GM, GP-GM |
| SPT (N) | $40 \leq N \leq R$ |

SPT: Standart Penetrasyon Testi

NP: Plastik özellik göstermeyen

GP : Kötü derecelenmiş temiz çakıllar ve çakıl-kum karışımları

GM : Siltli çakıllar, çakıl- kum-silt karışımları

Tünel güzergahının **13+335 km si ile 14+300 km si** arasında gözlenen **Çakıllı Kumlu Kil, Qal(c2)** alüviyal istifin tabanına yakın kotlarda yer almaktadır. Bu birim bej-açık kahve renkli, sert, orta-yüksek plastisiteli yer yer karbonat konkresyonlu ve nemlidir (Onargan ve ark. 2008).

Tablo 3.2 Çakıllı Kumlu Kil birimine ait zemin parametreleri ve değerleri

| Zemin Parametreleri | Değer ve Aralık |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Doğal Su İçeriği, W_n | % 27 (18 ≤ W_n ≤ 34) |
| Likit Limit (LL) | % 45 (25 ≤ LL ≤ 70) |
| Plastik Limit (PL) | % 21 (18 ≤ PL ≤ 41) |
| 4 no'lu elekte kalan | % 2 (0 ≤ \neq 4 ≤ 7) |
| 200 no'lu elekten geçen | % 75 (59 ≤ \neq 200 ≤ 91) |
| Birleştirilmiş zemin sınıflaması | CL, CH, ML-CL |
| SPT (N) | 25 ≤ N ≤ R |

SPT: Standart Penetrasyon Testi : CL : Düşük plastisiteli inorganik killer ve siltli killer

CH : Yüksek plastisiteli inorganik killer ve siltli killer : ML : Düşük plastisiteli inorganik siltler ve killi siltler

Gösel Tortullar; Tünel güzergahı boyunca gerek tünel aynasında gerekse üstünde egemen olarak karşılaşılan bu formasyon killi kireçtaşı, kıltaşı ve marn birimleri ile temsil edilmektedir. Bu formasyonun üst seviyelerinde yer yer ayrışma ürünü sert kile de rastlanmaktadır. Tünel kotunu oluşturan kayaçların ortalama RQD değerleri % 10-36 arasında değişirken CSIR Jeomekanik sınıflamada “Zayıf –Çok zayıf” kaya sınıfına dahil edilmektedir. Öte yandan, ayrışma ürünü kil birimi ise Terzaghi sınıflamasına göre sağlam (firm) zemin sınıfına girmektedir. Sondaj verilerine göre gösel tortulları oluşturan birimler üstten alta doğru ayrışma ürünü çakıllı kumlu kil, killi kireçtaşı, kıltaşı-killi kireçtaşı araldanması ve killi kireçtaşı şeklinde istiflenmiştir (Onargan ve ark. 2008). Bunlar;

Tümüyle Ayrışmış Kaya (Maf/W5); Formasyonun tümüyle ayrışmasından oluşan bu birim, bej-kahve renkli-kırmızı, çok katı-sert, orta yüksek plastisiteli, MnO_2 boyalı yer yer karbonat seviyeleri içeren çakıllı kumlu kil ile temsil edilmektedir. Doğal halinde sert-sağlam özelliklere sahip bu birimde kazı sonrası atmosferik koşullar ve su etkisiyle yersel stabilite problemleri yaşanmaması için ek önlemler alınması gerekebilecektir. Bu birime ait zemin parametrelerinin ortalama değerleri aşağıda verilmektedir (Onargan ve ark. 2008).

Tablo 3.3 Tümüyle Ayrılmış Kaya birimine ait zemin parametreleri ve değerleri

| Zemin Parametreleri | Değer |
|----------------------------------|-------|
| Doğal Su İçeriği, W_n | % 33 |
| Likit Limit (LL) | % 66 |
| Plastik Limit (PL) | % 27 |
| 4 no'lu elekte kalan | % 4 |
| 200 no'lu elekten geçen | % 85 |
| Birleştirilmiş zemin sınıflaması | CH |
| SPT (N) | 28 |

SPT(N) : Standart Penetrasyon Testi : CH : Yüksek plastisiteli inorganik killer ve siltli killer

Killi Kireçtaşı (Maf1); tünel inşasının bir bölümünde karşılaşılan killi kireçtaşı; bej renkli, orta-tümüyle ayrılmış, orta-sık eklemler, ondüleli-düzensiz, eklemler kil ve kalsit dolgulu, Aşırı ve Çok Zayıf Dayanımlı olup yer yer erime boşlukları ve killeşmiş seviyeler içermektedir. Ön Jeoteknik Rapor verilerine göre sondaj verilerinde bu birime ait RQD değerleri % 0-55 arasında değişmektedir. Genelde bu birimin ana litolojik yapısını korumasına karşılık ayrışma sonucu tümüyle bozunmuş olduğu görülmektedir (Onargan ve ark. 2008).

Kiltaşı-Killi Kireçtaşı Ardalanması (Maf2); Tünel güzergahında önemli bölümünde karşılaşılabilecek olan bu ardalanma genel olarak kiltası ve killi kireçtaşı birimlerinden oluşmaktadır. Ancak yer yer jeo-mekanik özellikleri açısından killi kireçtaşına benzerlik gösteren marn birimine de rastlanmaktadır.

Kiltaşı birimi; kahve renkli çok-tamamen ayrılmış yer yer killeşmiş Aşırı ve Çok Zayıf Dayanımlıdır. Killi kireçtaşı birimi ise bej, az-tamamen ayrılmış, orta-sık eklemler, eklemler kil ve kalsit dolgulu ve Çok zayıf dayanımlıdır. Marn birimi; kahve renkli-yeşilimsi kahve renkli, dağınık, zayıf-çok zayıf, çok tamamen ayrılmış, sık-orta eklemler, eklemler kil dolgudur. Bu birimde genelde bozunmuş yapı arz etmektedir. Atmosferik koşullar ve su etkisiyle bu birimlerin duraylılığı olumsuz bir

şekilde etkilenebilir. Ancak yapılan ölçümler yer altı suyu seviyesinin kazı kotunun altında olduğunu göstermektedir (Onargan ve ark. 2008).

İzmir Metrosu Hafif Raylı Sistem Üçüncü Aşama Delme Tünel İnşası güzergahın **13 + 335** ile **14 + 096** km arasında + % **0,10** eğimle toplam **761,00 metre** olarak planlanmıştır. Burada modellemenin yapıldığı **13+860-14+096 km** arasında karşılaşılması muhtemel jeolojik birimler bu bölümde ele alınıp incelenmiştir.

Tünel güzergahının **13+617 km** ile **13+992 km** leri arasında baskın olarak geçilecek birim Kıltaşı-Killi Kireçtaşı(Maf2) formasyonudur. Burada karşılaşılabilecek olan birimlerden Kıltaşı formasyonu kahverengi-bejimsi kahverengi, zayıf-çok zayıf, dağınık çok- yer yer tamamen ayrılmış yer yer killeşmiş bir yapı arz etmektedir. Killi Kireçtaşı(Maf1) birimi ise Bej-krem renkli, orta-sert-dağınık, orta zayıf, orta-çok ayrılmış yapı arz etmektedir. Birim içerisindeki hakim çatlaklar $40^{\circ} - 90^{\circ}$ açık-ondüveli-seyrekle, $10^{\circ} - 70^{\circ}$ kapalı, düzensiz karbonat-kil dolguludur. Bu birimlerin kazı boyunca dağılımı Tablo 3.4'te verilmiştir (Onargan ve ark. 2008).

Tablo 3.4 Km 13 + 617 - 13 + 992 arası güzergah bölümünde olası zemin kompozisyonu

| | % |
|--|----|
| Bozunmuş Killi Kireçtaşı (Maf1) | 17 |
| Bozunmuş Kıltaşı – Killi kireçtaşı ar dalanması (Maf2) | 83 |

Tünel üzerindeki tabaka kalınlığı **16 - 18 metre** arasında değişmektedir. Bu bölümde de yer altı suyu tünel boyunca kazı kotunun altında bulunmaktadır. Killi kireçtaşı birimi göreceli olarak kıltaşı – killi kireçtaşı ar dalanmasına göre daha sağlam bir yapı sergilemektedir.

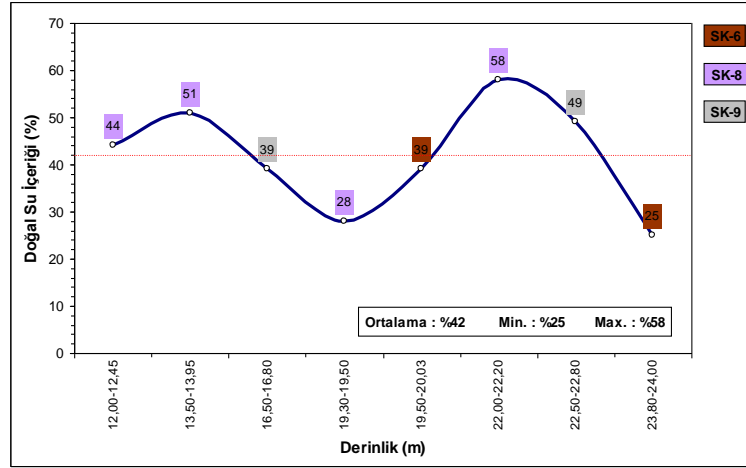
Güzergahın **13+ 992 – 14+096 km** arasındaki bölümü egemen olarak kıltaşı-killi kireçtaşı ar dalanması kısmen de alüvyona ait killi kumlu çakıldan oluşmaktadır. Km: 13 + 850 metreden sonra tam kesit halinde tünel zemininin oluşturan ar dalanma(Maf 2) Km: 13 + 970 den başlayarak tünel tavanından tabanına doğru tedrici olarak

alçalmakta ve yaklaşık km: 14 + 0 65 civarında tünel kotunun altına inmektedir. Ardalanmayı yüzeyleyen killi kumlu çakıl birimi (Qal/g) birimi ise Km: 13 + 877 den itibaren artan oranda tünel zeminini temsil etmeye başlamaktadır. Bu birimlerin kazıda olası dağılımları ise aşağıda verilmektedir. Tünel üzerindeki tabaka kalınlığı **13 - 18 metre** arasında değişmekte olup bu bölümde de yer altı suyu tünel boyunca kazı kotunun altında bulunmaktadır (Onargan ve ark. 2008).

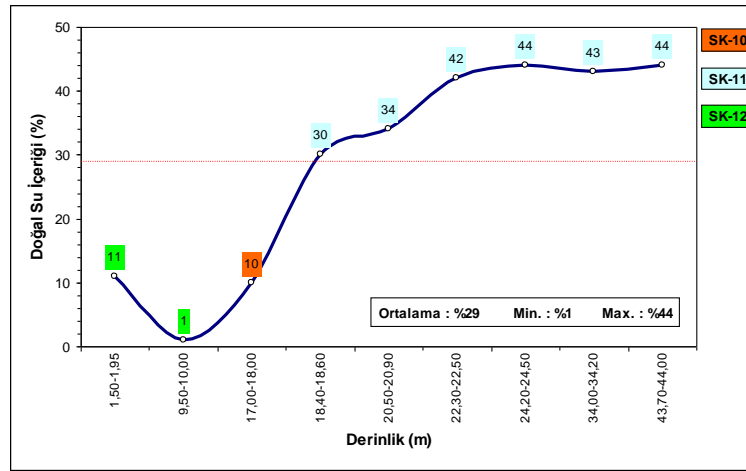
Tablo 3.5 Km: 13 + 992 - 14 + 096 Arası güzergah bölümünde olası zemin kompozisyonu

| | % |
|--|----|
| Killi Kumlu Çakıl (Qal/g) | 30 |
| Bozunmuş Kıltaşı – Killi kireçtaşı ardalanması (Maf2) | 70 |

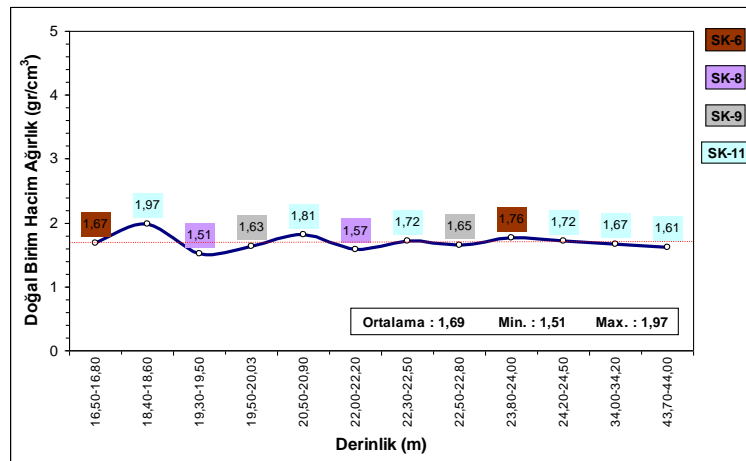
Güzerğahın **13+970** metresinden sonra **14+096 km** ye kadar yaklaşık **125** metrelik bölümünde tünel aynası ve üzerinde karşılaşılacak olan zemin özelliği gösteren birim muhtelif renkli, çok sıkı, killi kumlu Çakıl, nemli yer yer kuru, ince-iri, sert köşeli-yuvarlak; yoğunca ince-iri, sert kum ile ince malzeme içeren bir yapı sunmaktadır. Birimde yer yer % 50 ye varan sert dayanımlı, volkanik kökenli andezit ve aglomera blokları da yer almaktadır. Güzerğah boyunca elde edilen laboratuvar verilerinin gruplandırılması sonucunda incelenen iki bölüm için ortak grafik değerler elde edilmiştir. Sondajlı saha ve alınan örnekler üzerinde yapılan laboratuvar test çalışmaları sonucunda güzergahın bu iki bölümü için derinliğe bağlı zemin indeksleri, fiziksel ve mekanik özellik değişimleri aşağıdaki şekillerde grafiksel olarak verilmiştir (Onargan ve ark. 2008).



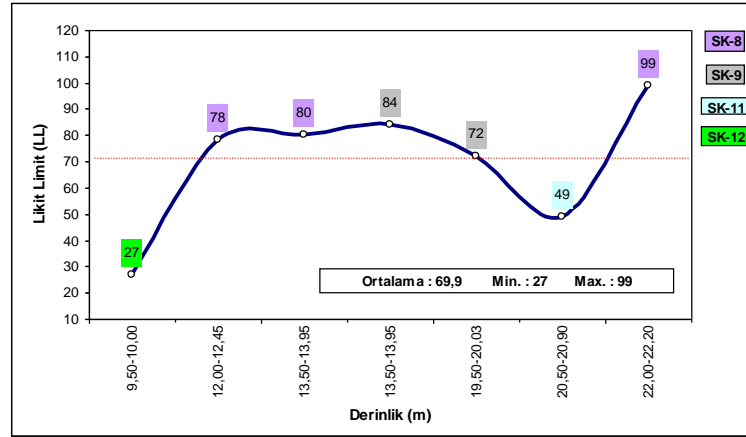
Şekil 3.6 . İncelenen bölümde derinliğe bağlı doğal nem içeriği değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



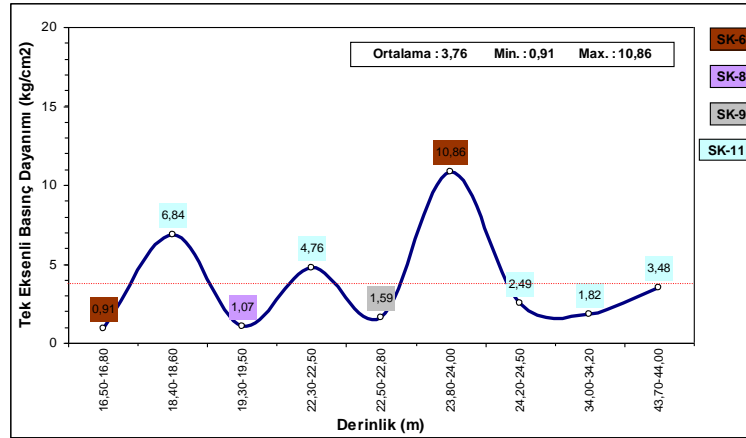
Şekil 3.7 İncelenen bölümde derinliğe bağlı doğal nem içeriği değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



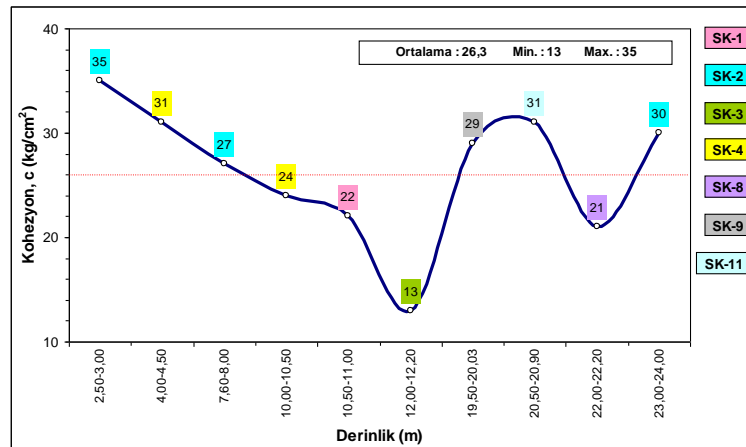
Şekil 3.8 İncelenen iki bölümde derinliğe bağlı doğal birim hacim ağırlığı değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



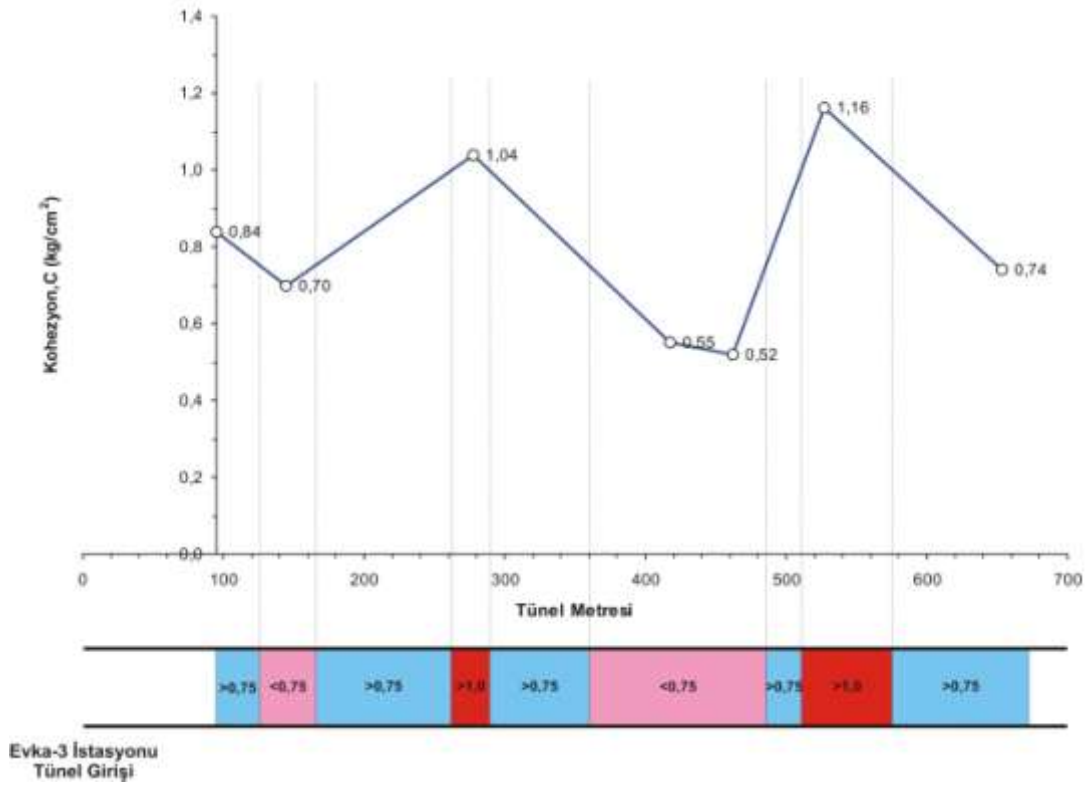
Şekil 3.9 İncelenen iki bölümde derinliğe bağlı Likit Limit değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



Şekil 3.10 İncelenen bölümde derinliğe bağlı Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



Şekil 3.11 Tüm güzergah boyunca derinliğe bağlı kohezyon değeri değişimi ve ortalaması (Onargan ve ark. 2008)



Şekil 3.12 Tünel güzergahı boyunca karşılaşılan zeminlerde kohezyon değeri değişimi (Onargan ve ark. 2008)

BÖLÜM DÖRT

NÜMERİK MODELLEME VE ANALİZ

4.1 Kaya Mühendisliğinde Nümerik Modelleme

Kaya kütlelerini modellemedeki genel zorlukların sebebi, doğal jeolojik bir malzeme olan kayanın bir üretim prosesi yoluyla tanımlanması yerine, fiziksel ve mühendislik özelliklerinin tahmin edilmek zorunda olmasıdır. Harrison ve Hudson 2000 yılında kaya kütlelerinin çoğunlukla Süreksiz, Anizotrop, Homojen ve Elastik olmadığını (DIANE) belirtmiştir. Kaya kütleleri, Dünyanın üst kabuğunun tektonik hareketler, depremler, yeryüzü çökmesi veya yükselmesi, buzullaşma döngüleri ve gelgitler gibi dinamik hareketleri tarafından devamlı olarak yüklü ve gerilim altındadır. Ayrıca kaya kütlelerinin çatlaklı ve gözenekli yapısı sıvı veya gaz fazda olabilen akışkanları içermesine sebep olur. Örnek olarak bulunduğu yerlerde karmaşık sıcaklık, gerilmeler ve akışkan basıncı durumlarında bulunan su, petrol, doğal gaz ve hava verilebilir. Bileşenlerin karmaşık kombinasyonu ve formasyonun uzun geçmişi kaya kütlelerini nümerik modelleme yoluyla matematiksel gösterimler için zor bir malzeme yapmaktadır.

Kaya kütlelerinin yeterli bir sunumu yapılacağı zaman, çatlakları yakalama ve kaya kütlelerinin tamamıyla doğal DIANE yapısı artı mühendislik sonuçları göz önüne alındığında, model kavramlaştırması sırasında aşağıdaki özellikleri içermesi önemlidir:

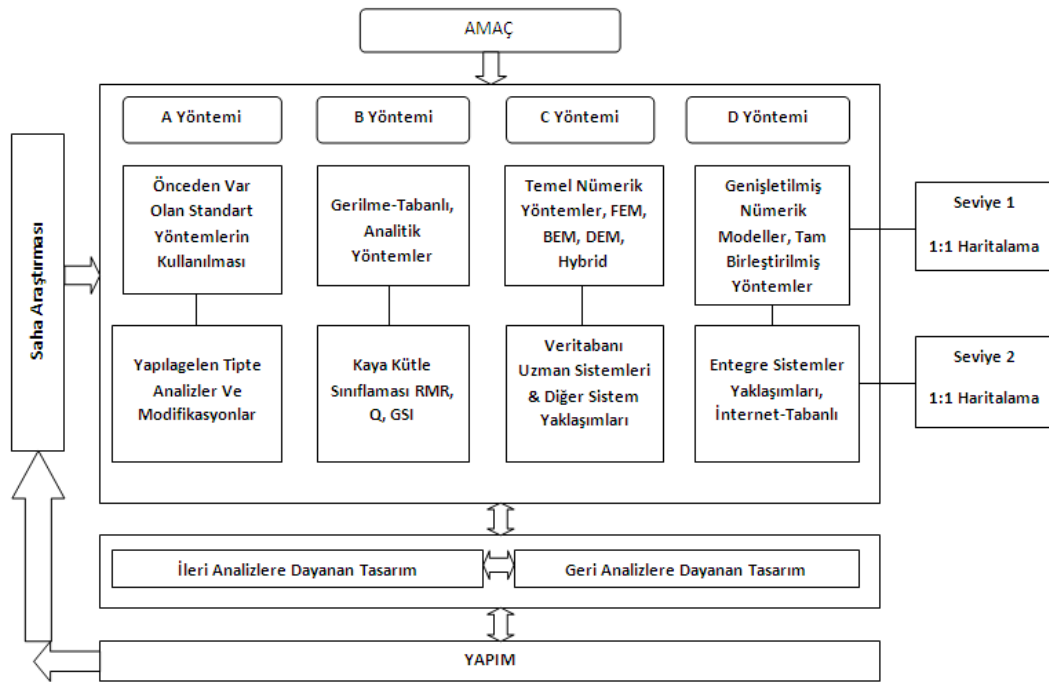
- Konuyla ilgili fiziksel prosesler ve onların kısmi diferansiyel denklemler ile matematiksel gösterimleri eş zamanlı olarak değerlendirilmelidir. Özellikle termal, hidrolik ve mekanik prosesler birleştirildiği zaman
- Ortak değişkenler ve parametreler ile ilgili mekanizmalar ve temel kanunlar
- Kaya gerilmesinin daha önceden var olan durumu
- Önceden var olan sıcaklık ve su basıncı durumu (kaya kütleleri gözenekli ve çatlaklı ve doğal jeotermal gradyan tarafından ısıtılmış)
- Doğal çatlakların varlığı

- Farklı lokasyonlarda bulunan özelliklerdeki değişkenler (kaya kütlesi homojen değil)
- Zaman/hız'a (time/rate) bağlı davranış (kaya kütlesi elastik değil ve kaymaya ya da plastik deformasyona maruz kalabilir)
- Mühendislik sapmalarının sonucu olan etkiler (geometri bozulmuş)
- Farklı ölçümlerle bulunan özelliklerdeki değişkenler (kaya kütlesi ölçüm bağımlı)

Kaya mühendisliği projeleri gittikçe daha da büyümekte ve modelleme gereksinimleri açısından daha talepkar olmaktadır. Tam olarak ve doğru birleştirilmiş bir model, geometrik ve fiziksel özelliklerin tamamının bilgisini ve çatlaklı kaya kütlelerinin parametrelerine ihtiyaç duyar. Bu yüzden mesele yeterli bir modelin nasıl geliştirileceğini bilmektir. Model mükemmel ya da tam olmayabilir, sadece amaç için yeterli olması gerekmektedir. Bu nedenle kaya mekaniği modelleme ve kaya mühendisliği tasarımı hem bir bilim hem de bir sanattır. Bilimsel temellere dayanırlar ama uzun zamanlı çalışmalar sonucunda elde edilen tecrübelerin birikimiyle desteklenen ampirik hükümlere ihtiyaç duyarlar. Bu yüzden modellerde mükemmel şekilde tanımlansalar bile, kaya mühendisliği tasarımı ve analizi için gereken bilginin miktarı ve kalitesi hiçbir zaman tam olamaz. Çok farklı amaçlara sahip kaya mühendisliği yapılarının tasarımı için geliştirilen kaya mekaniği modellemeleri ve farklı modelleme yöntemlerinin geliştirilmesi sebebiyle artık çok geniş yelpazede modelleme yaklaşımlarına sahibiz. Şekil 4.1'de Hudson (2001) tarafından yapılan, 4 yöntem ve iki seviyeye dayanan, 8 yaklaşımdan oluşan bir sınıflandırma gösterilmiştir.

Bu yöntemlerden,

- A yöntemi önceki tasarımların tecrübelerine dayanmakta
- B yöntemi basitleştirilmiş modellere dayanmakta
- C yöntemi konuyla en alakalı mekanizmayı yakalamaya çalışmakta
- D yöntemi ise "her şeyi kapsayan" modellemeye dayanmaktadır.



Şekil 4.1 Modelleme yaklaşımları tablosu (Hudson, 2001)

Mühendislik problemlerinin nümerik modellemesinde bazı problemler, sınırlı sayıda iyi tanımlanmış bileşeni kullanan yeterli bir modelle gösterilebilir. Bunun gibi bileşenlerin davranışları hem iyi bilinir hem bağımsız şekilde matematiksel olarak işlenebilir. Aynı bileşenlerin arasındaki ilişkilerin iyi tanımlanmasıyla sistemin genel davranışı belirlenebilir. Ayrı sistemler denen bu sistemlerin nümerik yöntemlerle çözümü çok kolay ve anlaşılırdır.

Diğer bazı problemlerde, bağımsız bileşenlerin tanımlaması problem etki alanının sonsuz alt-bölümüne gereksinim duyabilir. Ve problem sadece “ ölçülemeyecek kadar küçük unsur”ların matematiksel varsayımı kullanılarak işlenebilir. Bu genellikle, saha noktalarındaki sistem davranışını tanımlamak için diferansiyel denklemlerle sonuçlanır. Bu gibi sistemler “sürekli” yöntemler olarak adlandırılır ve serbestlik derecesi sonsuzdur. Bu tarz bir sürekli problemi bilgisayarda nümerik yöntemle çözmek için, sınırlı serbestlik derecesinde olan daha basit matematiksel tanımlarla yaklaşma davranışındaki problemin alanı sınırlı sayıda alt-alana bölünür. Bu alt alanlar, hem problemin ana diferansiyel denklemini hem de arayüzlerindeki süreklilik durumuna komşu elemanları ile cevap vermelidirler. Buna sürekli bir

dizinin bölünmesi denir. Bu, sonsuz serbestlik derecesindeki sürekli bir sistemin, sınırlı sayıda serbestlik dereceli bir ayrık sistem kullanarak yaklaşmasıdır (Jing, 2003).

4.2 Tünel Tasarımlarında Kullanılan Nümerik Yöntemler

Kaya mekaniği için nümerik modellemede en çok kullanılan yöntemler şunlardır:

Sürekli yöntemler;

- Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)
- Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)
- Sınır Elemanları Yöntemi (BEM)

Süreksiz yöntemler;

- Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM)
- Ayrık Çatlak Ağı Yöntemi (DFN)

Hibrid yöntemler;

- Hibrid FEM/BEM
- Hibrid DEM/DEM
- Hibrid FEM/DEM
- Diğer hibrid modeller

4.2.1 Sonlu Farklar Yöntemi (FDM)

Sonlu Farklar Yöntemi (FDM) yöntemi nümerik modelleme ailesinin en eski üyesidir. Ayrık elemanlar yönteminin (DEM) açık yaklaşımının temelini oluşturur ve çokça kullanılan yöntemlerden biridir. FDM sadece kavramsal basitliği yüzünden değil ayrıca malzeme doğrusalsızlıklarını ele almadaki esnekliği ile güçlü bir nümerik araç olmayı sürdürüyor. FDM' deki temel teknik, komşu grid noktalarında tanımlanan farklar ile kısmi türevlerin yerlerini değiştirerek ana kısmi diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılmasıdır.

Diferansiyel denklem takımlarının çözülmesinde kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Bir üçgen için diferansiyel denklem, Gauss'un iraksama teoreminin genelleştirilmesinden türetilmiştir. Diferansiyel denklemler, alanın node denen ayrık noktalarının bağlantılı serilerine bölünerek çözülür. Bu nodelar çözüm için deneme noktalarıdır ve sonlu farklar operatörleri kullanılarak belirleyici denklemlere bağlanırlar. Eleman matrislerini büyük bir global sertlik matrisiyle birleştirmek Sonlu Elemanlar modelinde olduğu gibi gerekli değildir. Bunun yerine Sonlu Farklar Yöntemi her adımda solu farklar denklemlerini yeniden üretir. Belirleyici denklemlerin türevleri cebirsel ifadelerle direk olarak yer değiştirir (Jing, 2003).

FDM zaman ve uzayın ikisinin de ayrıklaştırılmasında kullanılabilir. Ayrıca kolay hata tahmin teknikleri sağlar. Özellikle göçük ya da artan çökmeyi içeren büyük ve doğrusal olmayan problem için uygundur. FDM' yi düzensiz şekilli alanlarda ya da tekillik içeren problemlerde kullanmak zordur. Düzeli kafes sistemli konvansiyonel FDM, çatlaklarla, karmaşık sınır koşulları ve materyal heterojenliğiyle başa çıkmada esnek olamaması gibi eksikliklerinden dolayı zorlanır. Bu da standart FDM' yi pratik kaya mekaniği problemlerini modellemek için uygun olmaktan çıkarır. Ancak, düzensiz örgülerin (üçgen şeklinde kafes ya da Voronoi kafes sistemleri) kullanılmasıyla önemli bir ilerleme sağlanmıştır. Düzensiz örgüler hacim kontrolü ya da sonlu hacim tekniklerine yol açar. FLAC, mühendislik problemleri için FVM/FDM yaklaşımı kullanan en çok bilinen "gerilme analizi bilgisayar kodu"dur. Komşu düğüm noktaları arasındaki fonksiyonların devamlılığına gerek duymayan FDM de, çatlakların açık olarak gösterimi kolay değildir. Buna ek olarak, FEM deki gibi özel çatlak elemanlarına sahip olmak mümkün değildir. Ancak bu kaya mekaniğinin tüm alanlarını (şev stabilitesi, yer altı açıklıkları, birleştirilmiş hidro-mekanik vs) kapsayan kaya mühendisliği uygulamalarında en popüler nümerik yöntemdir (Jing, 2003).

Yöntemin avantajları şunlardır;

- Büyük matrisler ortaya çıkmadığından gereken bilgisayar hafızası ve çözüm zamanı sonlu elemanlardan azdır.

- Farklı özellikteki tabakalar ve kayacın ilerleyen yenilmesi (progressive failure) modellenebilir
- Tahkimat yapılmış kaya kütleleri elastik olarak modellenebilir
- Zamana bağlı deformasyon, visko-elastisite, elastoplastik malzeme, aşamalı kazı (incremental excavation), doğrusal olmayan elastisite, süreksizlikler, modele katılabilir
- Sonlu farklar ile kayacın ilerleyen yenilmesinde ortaya çıkan yüksek yer değiştirmeler (cm mertebesinde) modeli sayısal duraysızlığa götürmez.

Yöntemin dezavantajları ise şunlardır;

- Tüm kayaç kütlelerinin, hatta kazıdan bir kaç cm uzağının bile elemanlara ayrılması gerekebilir. Bu durum kapasitesi yüksek bilgisayar hafızası gerektiren bir işlemdir
- Sonsuzdaki sınır şartları yaklaşık olarak hesaplanır
- İterasyon zaman aralığını belirlemek deneyim ister
- Basit elastik problemler sonlu elemanlardan daha uzun zamanda çözülür.

4.2.2 Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM)

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM), mühendislik bilimindeki en popüler nümerik yöntemdir. Bunun sebebi, malzeme heterojenliği, doğrusal olmaması ve sınır durumlarının idaresindeki esnekliğidir. Sonlu elemanlar yöntemi, kayadaki birkaç noktadaki koşulu, bu noktalarda oluşan sonlu kapalı bölgenin durumu ile ilişkilendirir. Fiziksel ortam, tüm problem bölgesi elemanlara bölünerek sayısal olarak modellenir. Sonlu elemanlar yöntemi, her bir elemanın içerdiği malzemeye denk düşen koşulu açık yöntemle modelleyeceğinden heterojen kayaçların ya da doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin bulunduğu problemlerin çözümü için çok uygundur. Örgüde bitişik elemanların köşeleri aynı düğüm noktasını (node) paylaşır. Yöntemin esasına göre, bir elemanın içinde herhangi bir noktadaki deplasman (displacement), elemanın şekline göre düğümlerdeki deplasman cinsinden yazılır. Aynı elemanı paylaşan düğüm noktalarında deplasmanın sonuçta eşit olması amacı ile lineer bir denklem sistemi kurulur. Modele etki eden ve bilinen kuvvet ve deplasmanlar denklem sisteminde bilinenler olarak yer alırlar. Denklemin çözümü ile

bulunan düğümlerdeki deplasmanın türevi ile birim deformasyon (strain) ve her düğüm noktası için Hooke kanunu ile gerilmeler bulunabilir.

Kaya mühendisliği problemlerinin çözümünde sonlu elemanların kullanımını işlevsel kılabilmek için detaylandırılmış program tecrübesine gerek yoktur. FEM gelişmelerinin çoğu 1960'ların başlarından beri özel olarak kaya mekaniğine yönelik olmuştur (Goodman ve ark. 1968; Goodman, 1976; Zienkiewicz ve ark. 1970; Ghaboussi ve ark. 1973; Katona ,1983; Desai ve ark. 1984). 1960'ların başında, geleneksel FDM' nin düzenli düğümleri kaya mekaniği için gerekenleri karşılayamıyordu bu yüzden heterojenlik, doğrusal olmayan bozulabilirlik, in situ gerilmeler, karmaşık sınır koşulları, yer çekimi için esneyebilmesine bağlı olarak gelişmeler bu yönde olmuştur. Kaya mekaniği literatüründeki ünlü Goodman joint elemanları Sonlu Elemanlar kodlarında büyük ölçüde uygulamaya konmuştur (Jing ve Hudson,2002).

FEM' in formülü çeşitli fizik durumlarına dayanmaktadır. FEM analizi esas olarak 3 adımdan meydana gelmektedir; alan ayrıklaştırması, yerel yaklaşım, küresel matris denkleminin çözümü ve toplanışı. Bu yöntem, “node”lar olarak bilinen ayırık noktalarla bağlantılı olan elemanların bir araya gelmesiyle temsil edilir. Problem alanı çeşitli şekillerde ayırık elemanlara bölünmüştür. Örneğin iki boyutlu durumlarda üçgenler ve üç boyutlu durumlarda tuğlalar gibi. Süreklilik problemi, nodal güç serileri bakımından ve problem alanının deplasmanları için analiz edilmelidir.

Sonlu elemanların içindeki deplasman parçaları, nodal değişimleriyle ifade edilir. Bu değişimlerin kökenleri elemandaki gerilimi tanımlar. Ortamın sertliğinden oluşan gerginlik elemanın gerilimini belirler. Elemanın içindeki toplam gerilim, başlangıç ve ortaya çıkan gerilimin süper impozisyonu ile bulunabilir. Her bir elemanın matrisi, elemanların karakteristik tepkilerini tanımlar. Bu yardımcı matrisler toplam potansiyel enerjinin minimizasyonuna dayanır. Elemansal sertlik matrisleri, küresel güç ve yer değişimiyle ilişkili olan, küresel matris sertliğini vermek için bir araya getirilmektedir. Problem alanındaki elemanların sayısı sonsuza eğilimli olduğundan, bu diferansiyel denklemin çözümüne denktir (Jing, 2003).

Fakat bu sınırlamanın üstesinden gelebilmek için, süreksiz şekil fonksiyonları çatlak başlangıcının üstü kapalı simülasyonunda ve çatalaşma teorisi yoluyla büyümede kullanılmıştır. Bu yöntemin dezavantajı, tipik bir problem veri girişi hazırlanmasında hatırı sayılır miktarda zamana gerek duyulmasıdır. Özellikle 3 boyutlu problemlerde can alıcıdır ve veri hazırlanmasındaki sıkıntıların çoğunu oradan kaldıran karmaşık örgü nesil programlarının gelişimine yol açmaktadır. Bir çözüm elde etmek için çok sayıda eş zamanlı denklem çözülmek zorundadır. Eğer problem doğrusal değilse, hesaplama zamanı son derece artar. Çünkü eşzamanlı takımlar birçok kez çözülmek zorundadır.

Yukarıda bahsedilen tüm dezavantajlara rağmen FEM' in geniş çapta kullanılmasının nedeni, hesaplama gücü, materyal karmaşıklığı ve kullanıcı kolaylığı bakımından geniş kapasiteli ticari kodların geliştirilmesi ve materyal heterojenliğini, doğrusal olma durumlarını ve sınır koşullarını idare etmedeki esnekliği ve genelliğidir. Mühendislik yüzeyi ve kayadaki yer altı kazıları için yarar sağlayabilecek gelişmiş pek çok teknikten bir tanesidir. Dinamik 3 veya 2 boyutlu analizlerinin yanı sıra statik analizlerde mümkündür. FEM' in dikkat çekici avantajlarından biri, bir analizdeki jeolojik bilgiyi doğrudan kapsama yeteneğidir. Geometrik karışıklıklar, yönse kaya özellikleri, yüzey topografyası ile birleşmiş çeşitli litolojik üniteler, fay zonları, volkanik sokulum ve var olan kazılar Sonlu Elemanlar yaklaşımında kolayca yer alabilirler. Değişik karmaşıklık derecesiyle, kullanım kolaylığı ve hatırı sayılır çeşitlilikteki maliyete sahip sonlu eleman programları vardır.

4.2.3 Sınır Elemanları Yöntemi (BEM)

Bu yöntem adını problem geometrisindeki sınırların elemanlara ayrılmasından dolayı almıştır. BEM bugün kayadaki çatlak proseslerinin simülasyonu için en iyi araçtır. Galerkin BEM yaklaşımları, köşe problemlerinin üstesinden gelmek için umut vaat eden bir platform sağlıyor. BEM in avantajı daha küçük bilgisayar belleği ve blok benzeri matris yapısıdır.

Kaya kütlesi çok büyüktür ve pratik amaçlar için sonsuz boyutlarda varsayılabilir. Ayırıklaştırma hacmi yüzünden sonlu eleman, çok sayıda elemanın alan tepkisinin

modellenmesine ihtiyaç duyulduğu için, hacimlendirmede düşük oranda sınır yüzeyleri problemlerine elverişli değildir. Sınırlı eleman yöntemi, kazı yüzeyinin ayrıklaşmasının gerektiği yer olan kaya mekaniğindeki bu türden analizler için özellikle can alıcıdır. Bir problemi tanımlamak için gereken girilen verinin miktarı büyük oranda azaltılır ve sonsuz kaya kütesinin etkisi otomatik olarak kaya kütesinde incelenir. Sınırlı eleman yöntemi, eğer gerekliyse farklı özelliklerle bölgeler arasındaki sınırların ve alanın ayrıştırılmasını gerektirir. 3 boyutlu problemler için yüzey elemanları gerekliken, sınırdaki 2 boyutlu durum çubuk elemanları problemi temsil eder. Bu sebeple, problemin boyutsallığı teke indirilir. Bu özellikle problemi tanımamak için gerekli olan verinin miktarı, FEM' le karşılaştırıldığında büyük ölçüde azaldığı için çok can alıcıdır. BEM' in model boyutlarını azaltmadaki avantajı sayesinde, gerilim analizi için süreksizlik yönteminin deplasmanında kullanılan 3 boyut uygulaması etkilidir. Fakat algoritma hesaplaması o kadar da açık ve net değildir.

Sınır integral denklem yöntemi, bilinen Green görev çözümleri ile doğrusal sınır değeri problemlerini çözer. Green'in görev çözümü ve diferansiyel sistemi denge yüzey integrali olarak sınır değer problemlini formüle etmede kullanılır. BEM, farklı matematiksel yaklaşımlara bağlı olarak doğrudan veya dolaylı olabilir. Fakat ikisinin de işlevsel olabilmesi için temel tek çözüm olarak bilinen uzaydaki iki notanın bir fonksiyonunu ekonomik olarak hesaplayabilmesi gerekmektedir. Bu iki yöntemin en basit formları, uzayda çatlak benzeri iki yüzey modellendiğinde hata verir. Bu sadece çatlak modellemesi için değil ayrıca diğer boyutlarla karşılaştırıldığında önemsiz algılanan birbirine paralel iki yüzey arasındaki uzaklıklardaki, cevher kütlelerinin çıkarılmasıyla oluşan yerleşmelerinin de sonucudur.

BEM yöntemi, doğrusal olmayan denklemleri ve pek çok sayıda madde içeren karmaşık kaya mekaniği problemlerinde kullanılmasına rağmen, bu analiz yöntemi özellikle homojenlerde ve 3 boyutlu doğrusal elastik problemlerde etkilidir. Bu yöntemin avantajı materyal takımlarıyla karmaşık, doğrusal olmayan materyal kanunlarında azaltılmıştır çünkü materyal özelliklerinin değişimi olan yerlerde yüzeyin ayrıklaştırılması gerekir. Böylelikle veri girişinin hazırlığı daha da karmaşık

bir hale gelir. Bu yöntemdeki matris denklemleri FEM de olduğu gibi simetrik değildir. Çözülecek denklemlerin sayısı az olmasına rağmen hesaplama süresi aynı miktarda azalmaz. BEM, kaya kütlesi doğrusal elastik davranış sergilediğinde en etkili olan olmasına rağmen sınır koşullarının karmaşıklığında her hangi bir kısıtlaması yoktur. BEM de süreksizlik sınırlarının modellenmesinde 3 temel yaklaşım kullanılır, bunlar;

- 1) temel olarak süreksizlik yerindeki 2 veya daha fazla sınır eleman alanının çakışmasıdır.
- 2) deplasman süreksizliklerinin sınır elemanlarıyla kombinasyonunda kullanılması
- 3) BEM' in FEM ile birleştirilmesi

Gelişimin şu anki safhasında BEM sert kayalardaki gerilmelerin analizine kolay uygulanabilir. Ama genel olarak zayıf kaya kütlelerinde ve kömürde kullanılmaz. BEM, sert kaya kütlelerindeki gerilmelerin 3 boyutlu analizlerinin basit masaüstü bilgisayarlarda bile yapılmasına olanak sağlamıştır. BEM in hiçbir zaman FEM ve FDM nin yerini alması beklenmemesine rağmen en etkili çözümün BEM olduğu bazı tip problemler vardır.

BEM in kaya mekaniğindeki bazı kaya mekaniği uygulamaları şunları içerir:

- Çatlaklı veya çatlaksız yer altı kazılarının gerilim analizi
- Faylı kayalardaki madenciliğin simulasyonu
- Dinamik problemler
- İn situ gerilmeleri geri analizi ve elastik özellikleri
- Geçirgenlik ölçümleri için sondaj deliği deneyleri

4.2.4 Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM)

Ayrık elemanlar yöntemi kaya kütlelerinin süreksizlikler içerdiği ortamların modellenmesi için geliştirilmiştir. Bu yöntemde süreksizliklerle komşu bloklardan ayrılmış kaya parçası tek bir eleman olarak kabul edilir. Ayrık elemanlar yönteminin esası entegre sonlu farklara benzer. Çözüm küçük bir zaman parçası için yapılır. Her parçanın yer değiştirmesinden sadece komşu parçalar etkilenir. Problem ardışık iterasyonlar ile çözülür. Modelci, problemin çözüm zamanını deneyimleri ile saptar.

Süreksizlikler (eklemler ve faylar), aşamalı kazı, dolgu, kayacın ilerleyen yenilmesi, visko-elastik, tahkimat elemanları, termal gerilme ve yerçekimi etkisi kolayca ele alınabilir.

DEM, kaya mekaniğinde geniş çeşitlilikteki uygulamalarla birlikte hız gelişen sayısal mekanik bölgelerden bir tanesidir. DEM, nispeten yenidir ve pek çokları bunu kaya mekaniğinde tasarım ve analizler için nümerik teknik olarak henüz kanıtlanmamış sayarlar. DEM in formüle edilmesi ve gelişimi, Cundall'ın (1971, 1974, 1980, 1988) ilk çalışmalarından bu yana uzun bir zaman içerisinde gelişmiştir. Bu yöntem aslen kaya mekaniği uygulamaları için geliştirilse de diğer araştırma alanlarına kadar genişletilmiştir.

Bu yöntem ilk başta çatlaklı kaya kütlelerinin ikiboyutlu temsili için geliştirilmiştir. Ama şimdi parçacık akış araştırmalarında, granül malzemelerinde ve kaya ve betondaki çatlak gelişimi uygulamalarında kullanılacak şekilde genişletilmiştir. UDEK ve 3DEK, statik ve dinamik analizleri yapmada en popüler bilgisayar kodlarıdır. 3DEK derin yer altı madenlerindeki göçük olaylarında kullanılmaktadır.

Bu yöntem alana, FEM ve BEM' e zıt olarak sürekliden çok süreksiz olarak davranır. Elemanlar temas noktalarında gelişen güçler arasında bir diğeriyle etkileşime geçer. Denge denklemleri temas kanunları ve sınır durumları istenilen hale gelinceye kadar çözülür.

4.2.5 Ayrık Çatlak Ağı Yöntemi (DFN)

Çatlaklı kaya yapılarındaki sıvı akışı ve aktarımı proseslerini dikkate alan özel bir ayrık modeldir. DFN iki anahtar faktörün anlaşılması ve sunulması üzerine kurulmuştur; çatlak sistem geometrisi ve her bir çatlağın iletirliği. DFN yaklaşımları, çok fazlı sıvı akışları için geliştirme, kuru sıcak kaya rezervuarı simülasyonları, çatlaklı kayaların geçirgenliğinin tanımlaması ve suyun kaya şevleri ve yeraltı kazılarındaki etkileri gibi konularda uygulamaları olmasına rağmen kaya çatlaklarının geometrisi hakkındaki bilgi eksikliği daha geniş kullanım alanları olmasını engelliyor.

Bağlantılı çatlaklardan oluşan bir sistem sayesinde sıvı akışı ve nakliye için geniş uygulamaları olan ayrık bir yöntemdir. DFN, FEM ve BEM örgülerini, boru modellerini ve lattice modelleri kullanır. Boru model ve lattice model çatlak sistemi geometrisinin daha basit sunumunu sağlar. DFN yaklaşımı çatlak sistemlerinin stokastik simülasyonuna dayanır. Çatlak sistem geometrisinin ölçek bağımlılığını değerlendirmek için fractal konsepti DFN yaklaşımına uygulanmıştır. FRANCMAN/MAFİK ve NAPSAK DFN formüllerinden bazılarıdır. Bu yöntemin bazı sınırlamaları vardır. Bu yöntem sadece kabaca tahmin edilebilen ve grafikte geçerli olunamayan in situ çatlak sistem geometrisinin yorumuna bağlıdır.

Fakat DFN model çatlak kaya problemleri için geniş uygulamalara sahiptir. Aşağıda bazı örnekler verilmiştir;

- Multifaz sıvı akışının gelişimi
- Sıcak-kuru-kaya rezervuar simülasyonu
- Çatlaklı kayaların geçirgenliğinin sınıflandırılması
- Yer altı kazıları ve kaya şevlerindeki su etkileri

4.2.6 Hibrit Modeller

Çatlaklı kayalardaki akış problemleri ve deformasyon için kullanılır. Hibrid yöntemler FEM/BEM, DEM/FEM ve DEM/BEM' in avantajlarını almak için birleştirilmiştir. Her birinin avantajlarını alıp dezavantajlarından kaçınılmıştır. FEM/DEM doğrusal olmayan ya da çatlaklı alanlar için kullanılır. Böyle yerlerde açık temsil gerekmektedir. BEM uzak alan kayalarının simülasyonunda kullanılır. Bu yöntemlerin birleştirilmesi, uzak kaya alanların yakın kaya alanlarına etkilerinin etkili temsili için nümerik teknik sağlar.

Her bir modeli ayrı ayrı kullandığınızda ortaya çıkan eksikliklerden kaçınmak için ve hesaplama zamanında, verimlilikte ve kesinlikte optimumlaşmak için FEM ve BEM' i birleştirme 1977'de Zienkiewicz tarafından öne sürülmüştür. Bu yöntemde, yakın olan sonlu elemanlarla ayrıklaştırılırken uzak alan da sınır eleman

formülleriyle ayrıklaştırılır. Kaya mekaniğinde bu yöntem genel olarak yer altı kazılarının davranışlarını simüle etmek için kullanılmıştır.

Lorig ve Brady (1984) dairesel açıklığın yakın alanını ayırık elemanlar yöntemi ve dairesel açıklığın uzağındaki alanı da sınır elemanlar yöntemi kullanarak karma bir yöntemle modellemiştir.

4.3 Çelik Boru Kemer Boyutlarının Nümerik Model ile Belirlenmesi

İzmir Metro hattının geliştirilmesi projesi kapsamında 3. aşama olan Ege Üniversitesi-Bornova Merkez bağlantısı kısmında inşa edilecek olan tünelin kazısının, tünel ön-destekleme sisteminin ve tünel ana kaplamasının tahkiki için Sonlu Elemanlar (Finite Elements) yöntemiyle analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, ampirik ve analitik yöntemler saha çalışmaları ile desteklenerek gerçekleştirilmiştir. Saha çalışmaları olarak, Daha önce yapılmış sondajlara ek olarak kazı kesitinde karşılaşılabilecek olan kaya-zemin tiplerinin belirlenmesine yönelik toplam 10 adet yeni sondaj yapılmış, yapılan sondajlardan alınan numuneler üzerinde 300'ün üzerinde laboratuvar testleri yapılmak suretiyle kazı esnasında karşılaşılabilecek malzemelerin mühendislik özellikleri ve in-situ (yerinde) testler ile kazı esnasında karşılaşılabilecek olan birimlerin kütleli özellikleri belirlenmiş, daha önce yapılmış olan saha çalışmaları incelenmiş ve tüm güzergahı temsil edecek şekilde sismik ve özdirenç ölçümleri yapılmıştır.

Yukarıda değinildiği üzere bu tip çalışmalar en az bir kaç yöntemin bir arada değerlendirilmesi sonucunda daha başarılı sonuçlar vermektedir. Bu nedenle, analiz yöntemlerinden birisi olarak da, yapılacak olan Gerilme-Deformasyon analizi için en uygun yöntem olan “yakın saha gerilme ve deformasyonları”nı elde edebileceğimiz Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) ile nümerik modelleme yöntemi seçilmiştir. Nümerik modelleme yöntemleri, sorunların başka yöntemlerle çözümü halinde bile mutlaka başvurulması gereken bir yöntemdir (Aksoy ve ark. 2006).

Yapılan sayısal modellemelerde sonlu elemanlar metodu ile analiz yapan PLAXIS 3D Tunnel Version kullanılmıştır. Bu program oldukça zayıf zemin koşullarında yeraltı kazılarının modellenmesinde uluslararası çalışmalarda kullanılmakta olup, bu programla yapılan çalışmalar uluslararası bilimsel dergilerde yer almaktadır.

Yapılacak değerlendirmeler sonucunda nihai malzeme özellikleri, kullanılması planlanan ön destekleme elemanları ve ana kaplama betonunun özellikleri belirlenir ve analizlerde girdi olarak kullanılır. Oluşturulan nihai modellerde ön destekleme parametreleri iki kat 30 cm. püskürtme beton (C30 betonundan) ve 9 metre uzunluğunda 4,5 m bindirmeli çelik boru kemerdir. Uygulanan düzende çelik boru deliklerinin dışları arasında 30 cm ara bulunmaktadır. Çelik Boru Kemer Uygulamasında önemli olan diğer bir değiştirge bindirme boylarıdır. Bindirme boyu kullanılacak çelik boru miktarını direk etkilerken, tünel aynası önünde oluşan yüklerin karşılanması konusunda da önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında 4,5 m boru kemer bindirmesi değerlendirilmiştir. Kazı planı olarak ise üst yarı, alt yarı ve invert ve tahkimatının silsileli olarak 0,8 metre ilerlemesi ve tahkimatının yapılması değerlendirilmiştir.

Oluşturulan modelde, tünel kazısının NATM' da uygulanan kazı aşamaları aşağıda verilmiştir.

- Çelik boru kemer (2 inch, et kalınlığı 5,6 mm) uygulaması için 9 m'lik boruların yerleştirilmesi (bindirme 4,5 m)
- Üst yarı ilerleme miktarı: 0,8 m
- Üst yarı ön desteklemesi (30 cm. püskürtme beton)
- Alt yarı ilerleme miktarı: 0,8 m
- Alt yarı ön desteklemesi (30 cm püskürtme beton)
- İnvirt ilerleme miktarı: 0,8 m
- İnvirt ön desteklemesi (30 cm püskürtme beton)

Analizi yapılan modelde kullanılan kaya ve yapı malzemelerine ait özellikler Tablo 4.1 ve Tablo 4.2'de verilmektedir.

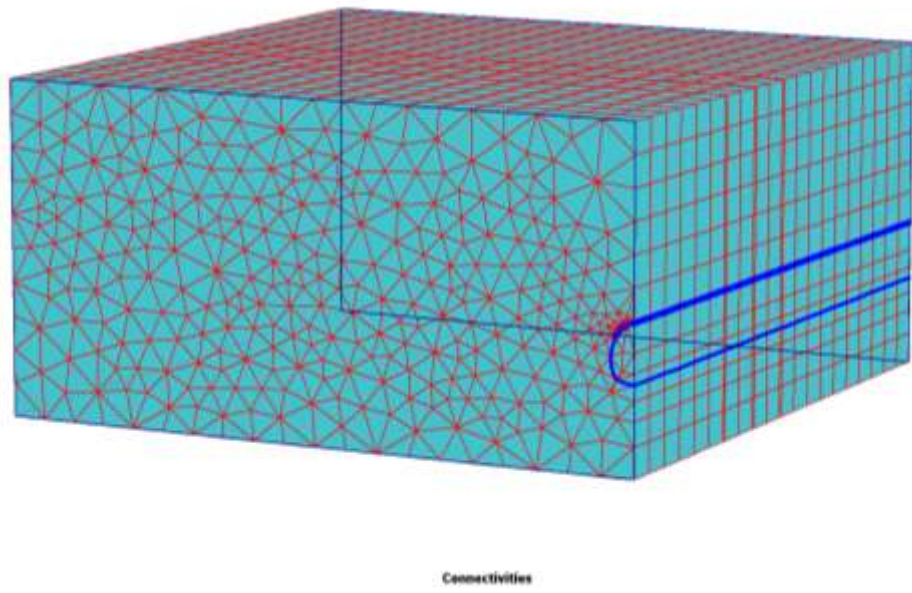
Tablo 4.1 C4 Destekleme Klasında Kullanılan Zemin Parametreleri

| | | Formasyon 1 (Mohr-Coulomb) |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Parametre | | Drained |
| γ_{unsat} | [kN/m ³] | 18.00 |
| γ_{sat} | [kN/m ³] | 18.00 |
| kx | [m/day] | 0 |
| ky | [m/day] | 0 |
| kz | [m/day] | 0 |
| e_{init} | [-] | 1 |
| ck | [-] | 1E15 |
| Eref | [kN/m ²] | 10000.000 |
| v | [-] | 0.35 |
| Gref | [kN/m ²] | 3704 |
| Eoed | [kN/m ²] | 16050 |
| cref | [kN/m ²] | 10.00 |
| ϕ | [°] | 15 |
| ψ | [°] | 0.00 |
| Einc | [kN/m ² /m] | 0.00 |
| yref | [m] | 0.000 |
| cincrement | [kN/m ² /m] | 0.00 |
| Tstr. | [kN/m ²] [-] | 0.00 |
| Geçirgenlik | | Neutral |

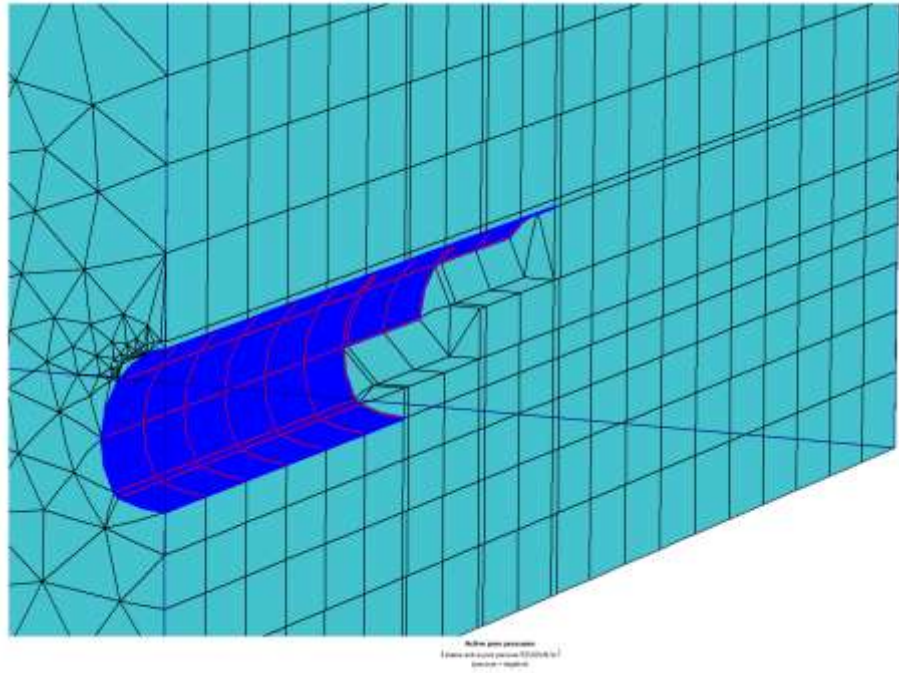
Tablo 4.2 C4 Destekleme klasında kullanılan yapı elemanları parametreleri

| No. | Yapısal Eleman | EA [kN/m] | EI [kNm ² /m] | W [kN/m/m] | v [-] | Mp [kNm/m] | Np [kN/m] |
|-----|-----------------|--------------|-----------------------------|---------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Püskürtme Beton | 3000000 | 22500 | 8,4 | 0.15 | 1E15 | 1.154e16 |
| 3 | Çelik Boru | 19480 | 14,85 | 7.6 | 0,15 | 1E15 | 2.829e16 |

Üst yarı ilerlemesi ve tahkimatı, altı yarı ilerlemesi ve tahkimatı, invert ilerlemesi-tahkimatı şeklinde tasarlanan kazı aşamalarını içerecek şekilde oluşturulan modele ait mesh görüntüsü Şekil 4.2’de verilmektedir. Şekil 4.3’te ise kazı aşamaları görülmektedir. Modele yüzeyden 5 m aşağıda yeraltı suyu verilmiştir.



Şekil 4.2 Modelin ağ görüntüsü



Şekil 4.3 Modelde uygulanan kazı aşamaları görüntüsü

Yapılan analizlerde öncelikle çelik boruların olmadığı model analiz edilmiştir. Bu analiz sonucunda model daha 2. aşama olan üst yarı tahkimatının yapılması esnasında yenilmiştir. Yenilen modele ait görünüm Şekil 4.4'te verilmektedir. Çelik boru kemer uygulamasının yapılmadığı model analizinde kullanılan inşaat aşamaları aşağıda verilmektedir.

Birinci Aşama: 0,8 m üst yarı kazı yapılması.

İkinci Aşama: Bir önceki aşamada kazısı yapılan 0,8 m'lik üst yarının tahkimatının yapılması

Üçüncü Aşama: 0,8 m alt yarı kazısının yapılması

Dördüncü Aşama: Bir önceki aşamada kazısı yapılan 0,8 m'lik alt yarının tahkimatının yapılması

Beşinci Aşama: 0,8 m'lik invert kazısının yapılması

Altıncı Aşama: Bir önceki aşamada kazısı yapılan invertin tahkimatının yapılması.

Çelik boru kemer uygulamasının kullanıldığı modele ait inşaat aşamaları ise şöyledir;

Birinci Aşama: 9 m çelik boru kemerler (2 inch, et kalınlığı 5,6 mm) 4,5 m bindirme olacak şekilde,

İkinci Aşama: Birinci aşama çözümünden sonra, tünelin üst yarısında 0,8 m'lik kazı gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada kazılmış üst yarıya herhangi bir ön destekleme uygulanmamıştır.

Üçüncü Aşama: Bu aşamada, ikinci aşamada kazısı yapılan üst yarıya tahkimat uygulaması yapılmıştır.

Dördüncü Aşama: Üçüncü aşama sonucunda stabil görülen modelde, üst yarıdan 10 m geride bulunan alt yarıda, 0,8 m alt yarı kazısı yapılmış olup, kazısı yapılmış bölgeye herhangi bir tahkimat uygulanmamıştır.

Beşinci Aşama: Dördüncü aşamada kazısı gerçekleştirilen 0,8 m'lik alt yarı kazısının tahkimatı yapılmıştır.

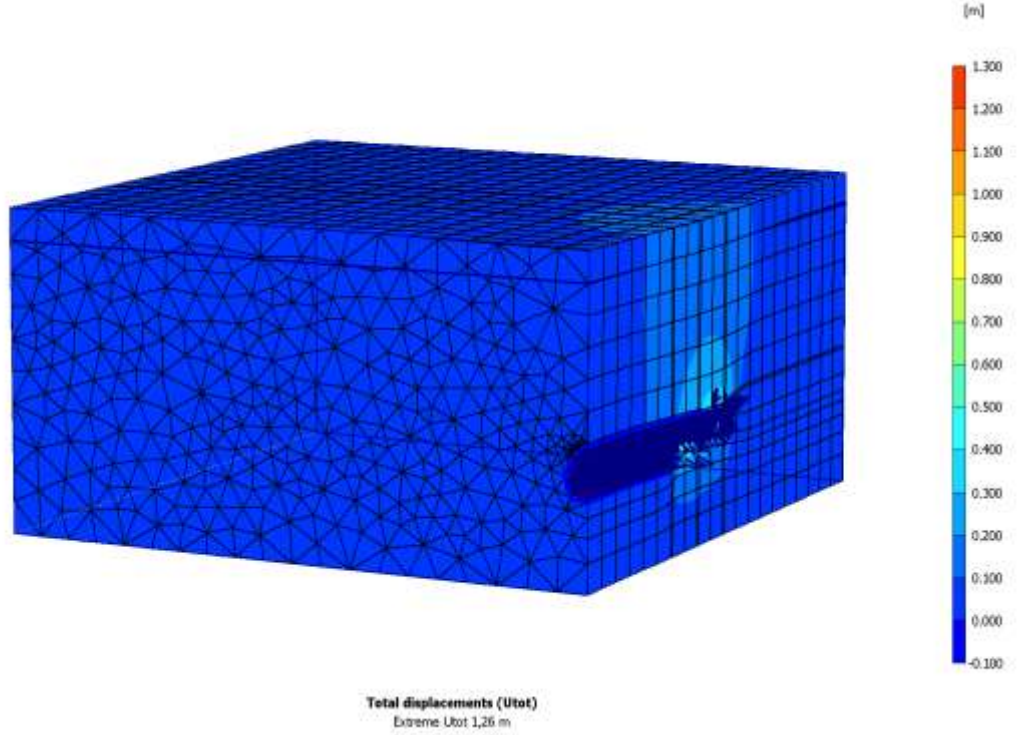
Altıncı Aşama

İki önceki aşamada gerçekleştirilen alt yarının (bench) 10 m gerisinde bulunan tünel tabanında 0,8 m invert kazısı yapılmıştı.

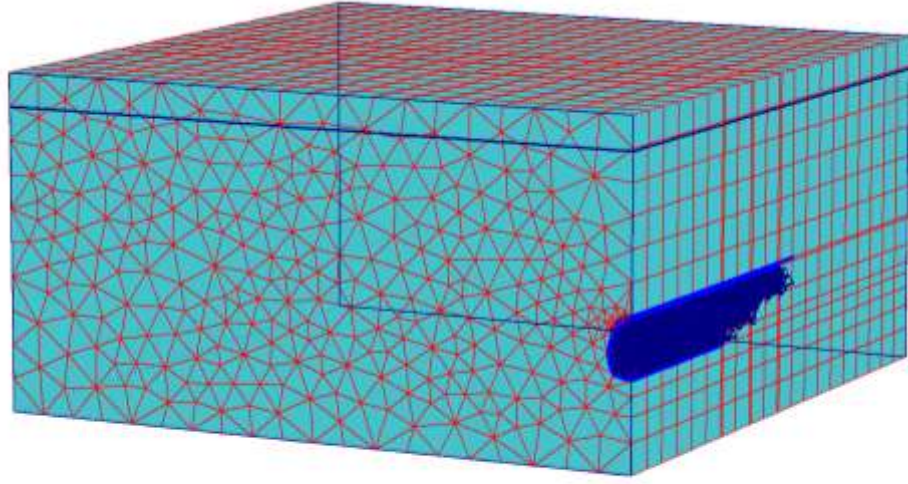
Yedinci aşama

Bir önceki aşamada yapılan 0,8 m'lik invert kazısının stabilitesini sağlamak amacıyla invert tahkimatı yapılmıştır.

Yukarıda aşamaları anlatılan kazı ve ön desteklemenin, modelleme yapıldıktan sonra elde edilen verileri aşağıdaki şekillerde (Şekil 4.4 – 4.28 arası) verilmiştir.

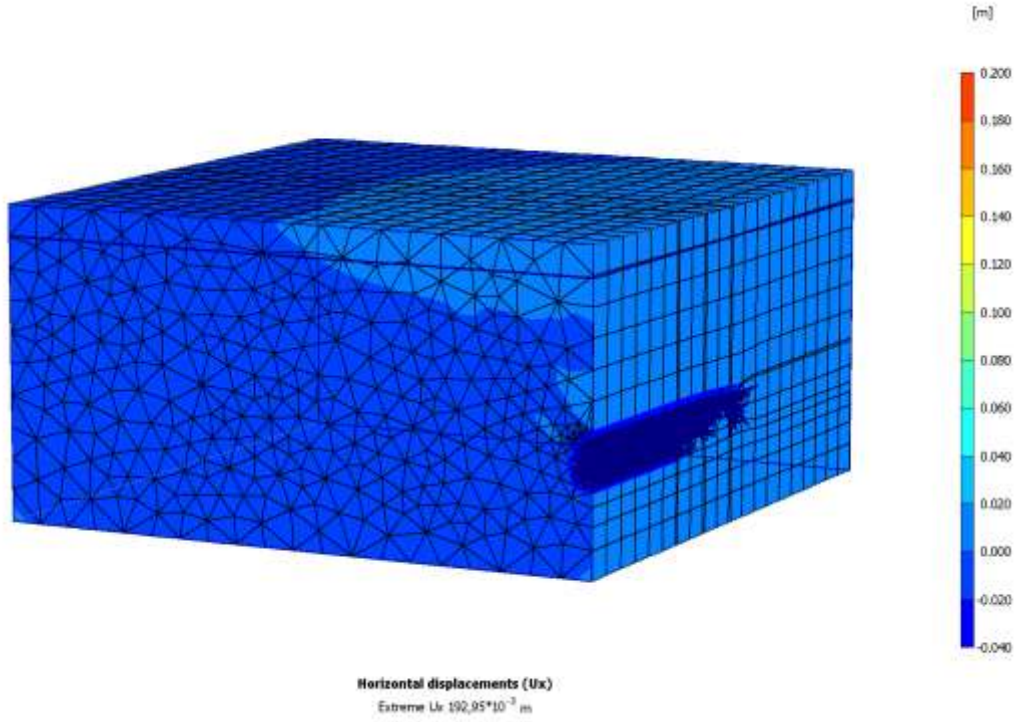


Şekil 4.4 Çelik Boru Kemer uygulaması yapılmayan ve yenilen modelin deforme olmuş görüntüsü

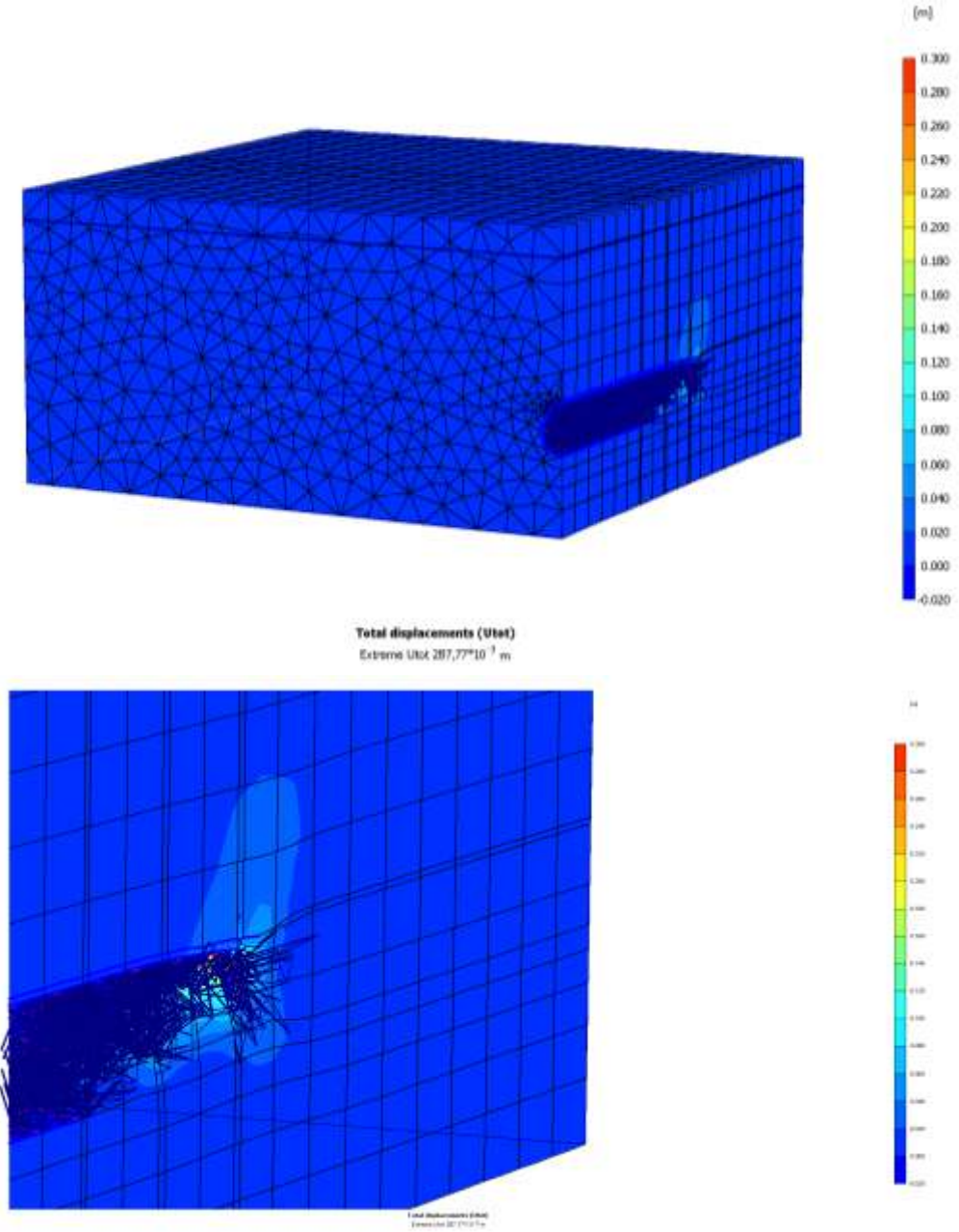


Deformed Mesh
Extreme total displacement 0,00 m
(Minimum element size is 0,00 mm)

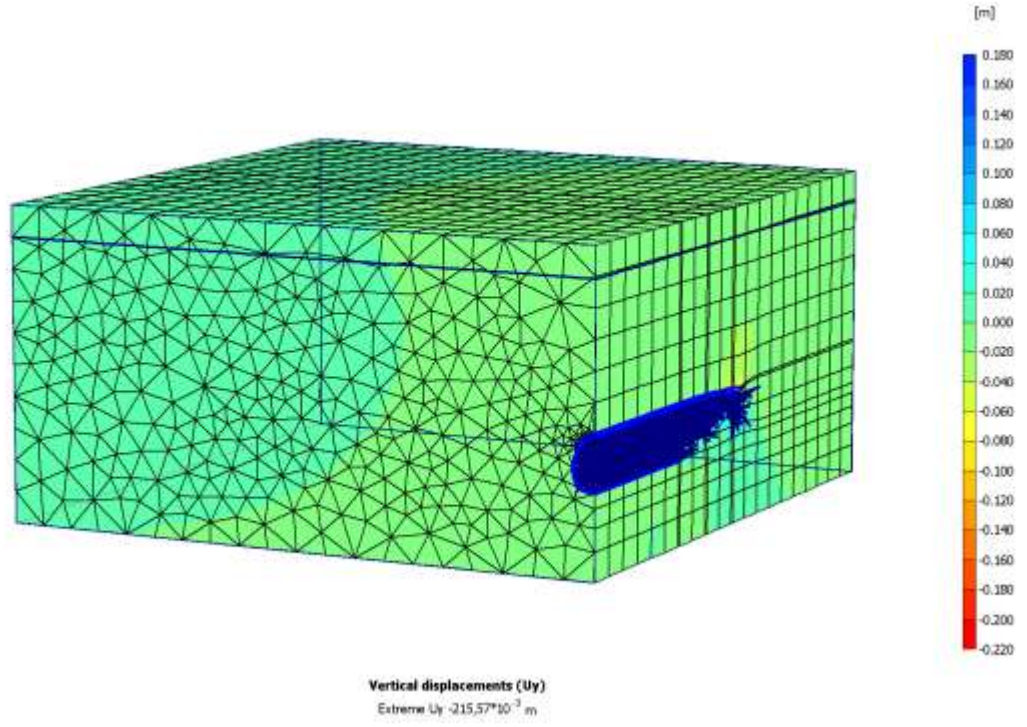
Şekil 4.5 2 inçlik Çelik Boru Kemer Uygulaması için modele entegre edilen kazi aşamaları



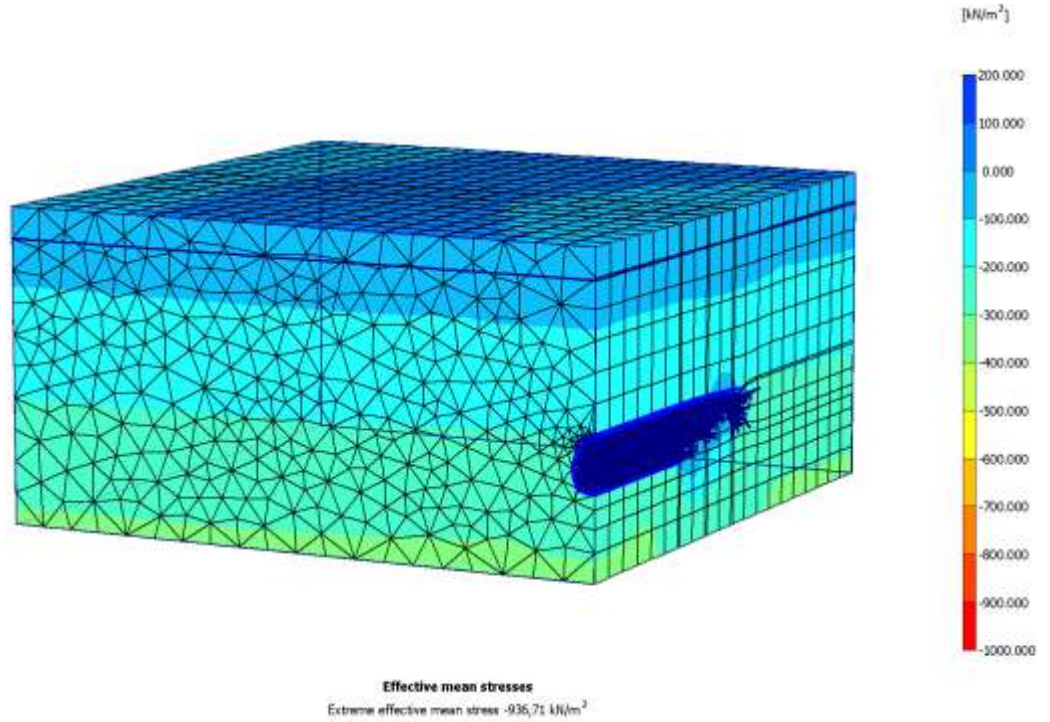
Şekil 4.6 2 inç Çelik Boru Kemer Uygulanması halinde oluşan yatay deformasyonların renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 19,2 mm)



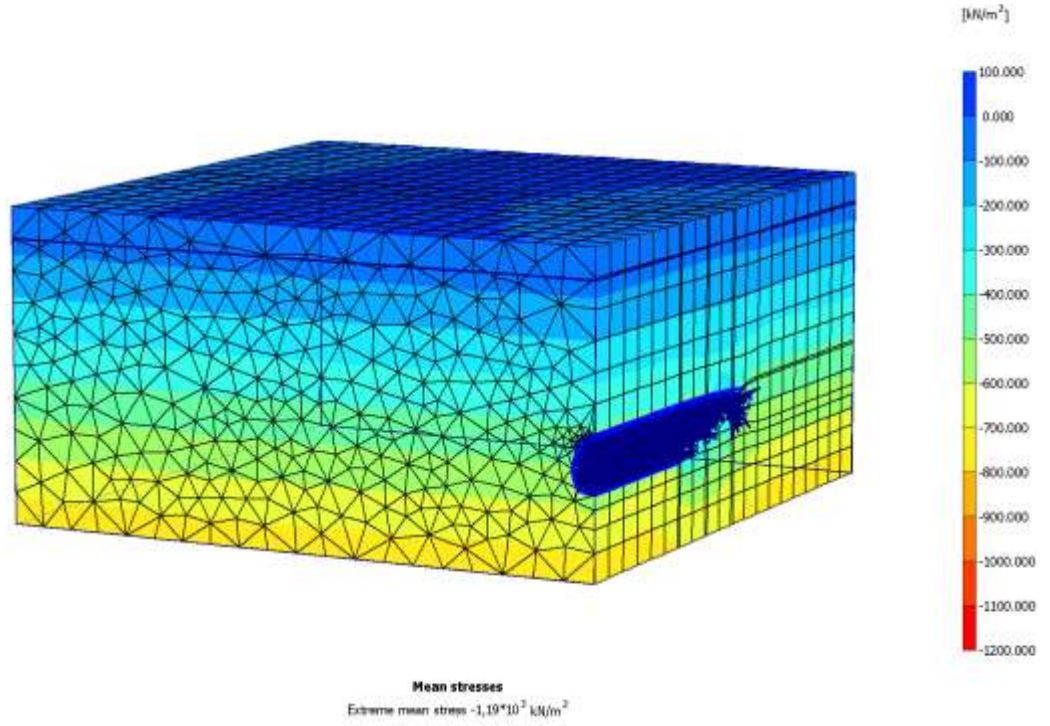
Şekil 4.7 2 inç Çelik Boru Kemer Uygulanması halinde oluşan toplam deformasyonların renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 28,7 mm)



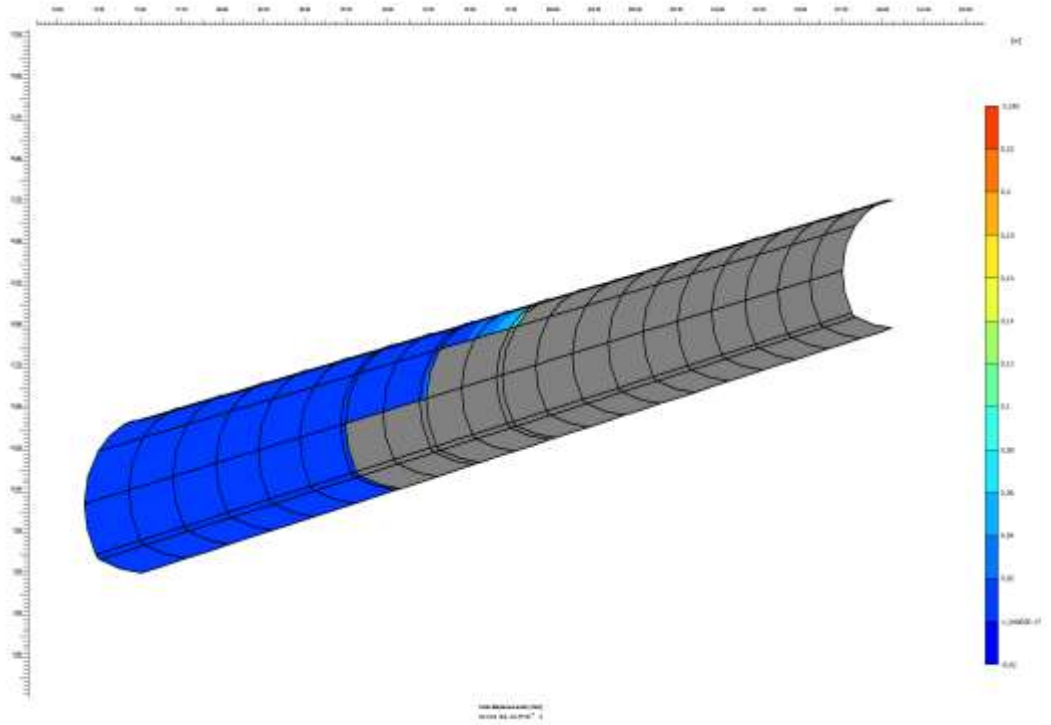
Şekil 4.8 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde oluşan düşey deformasyonların renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 21,5 mm)



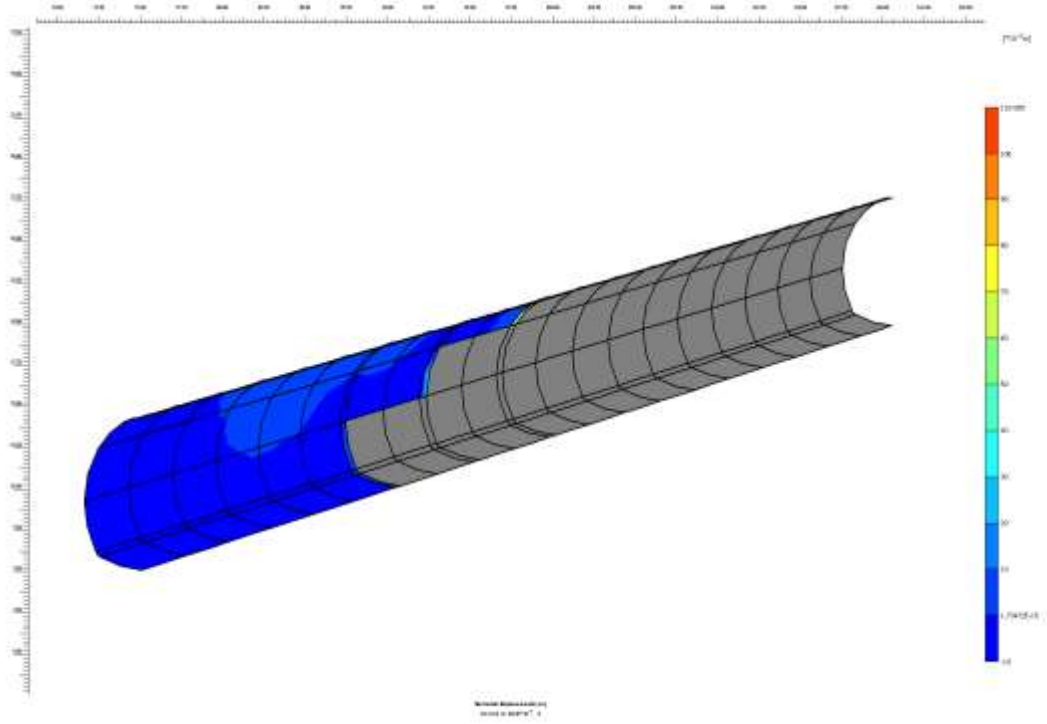
Şekil 4.9 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde oluşan efektif gerilmelerin renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 936,71 kN/m²)



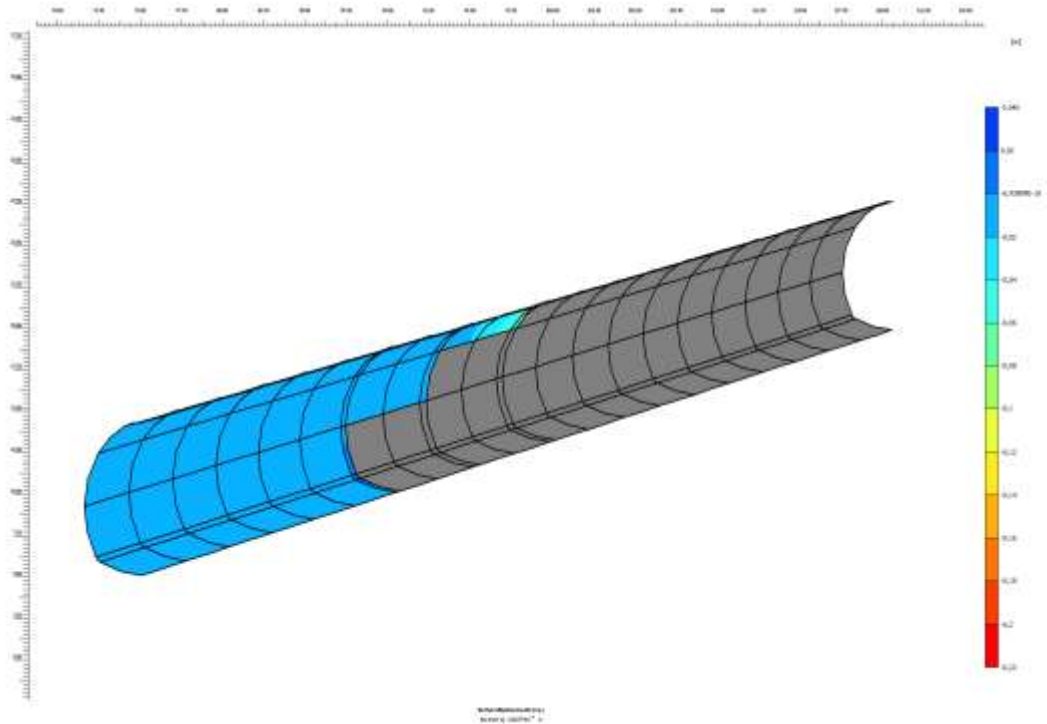
Şekil 4.10 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde oluşan toplam gerilmelerin renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 1190 kN/m²)



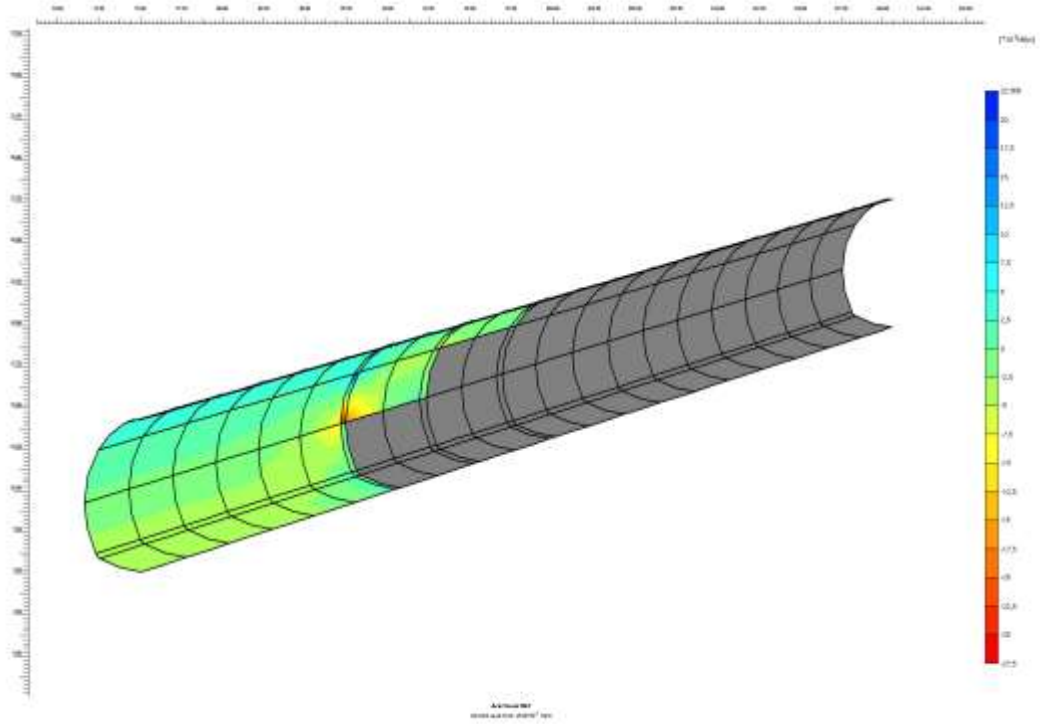
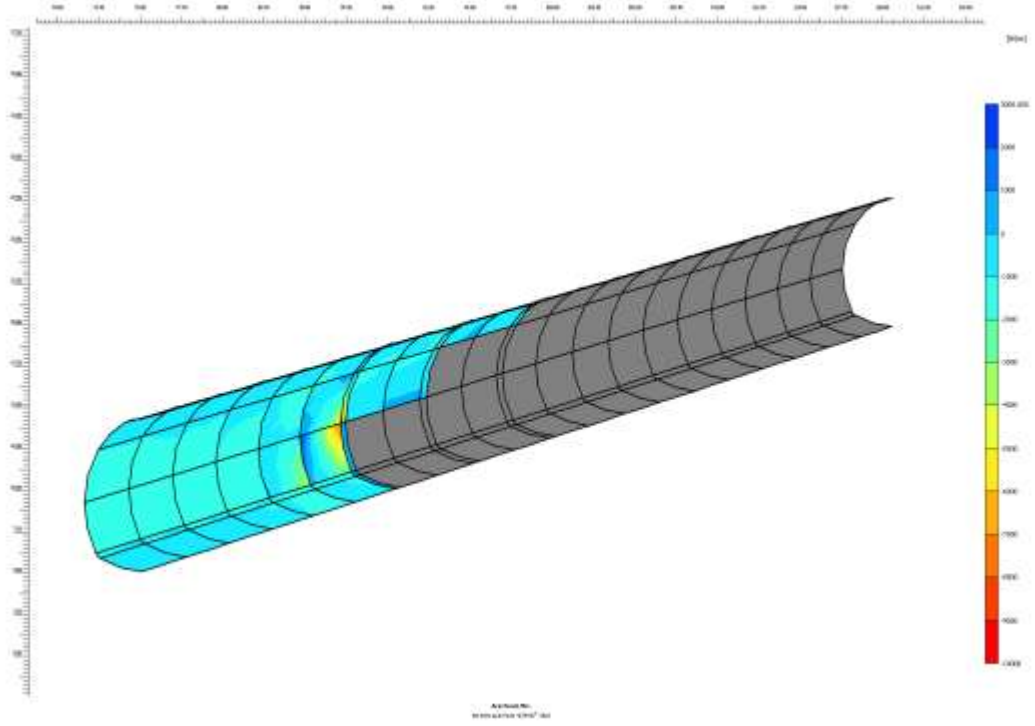
Şekil 4.11 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan toplam deformasyonların renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 23,1 mm)

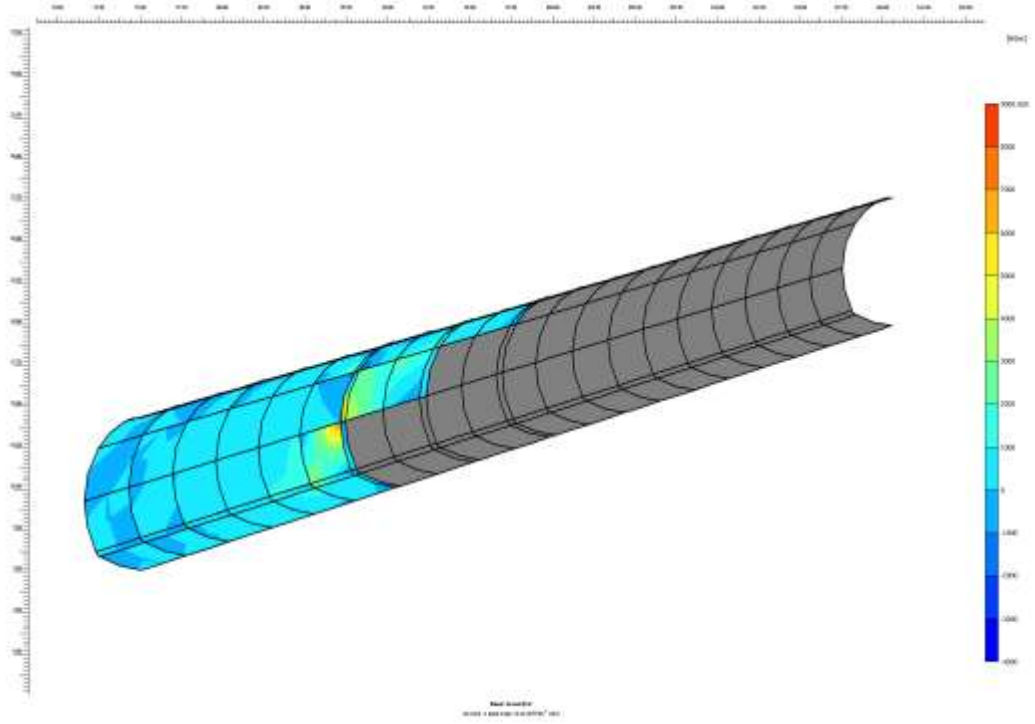


Şekil 4.12 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan yatay deformasyonların renk konturlarıyla gösterimi (Maksimum 10,5 mm)

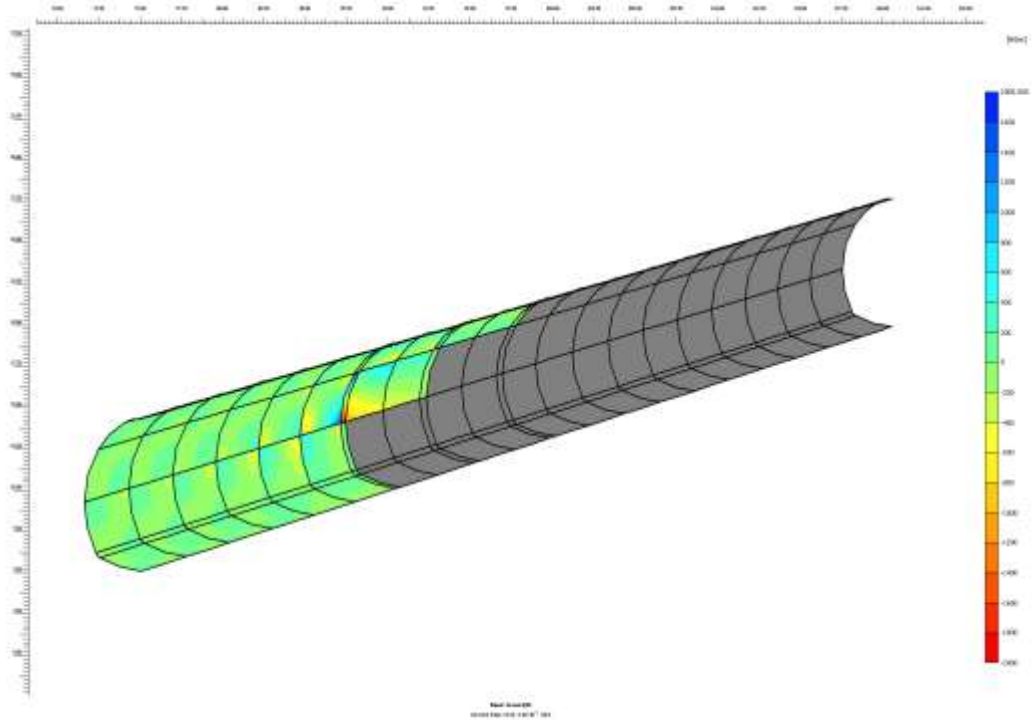


Şekil 4.13 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan düşey deformasyonların renk konturlarıyla Gösterimi (Maksimum 21,7 mm)

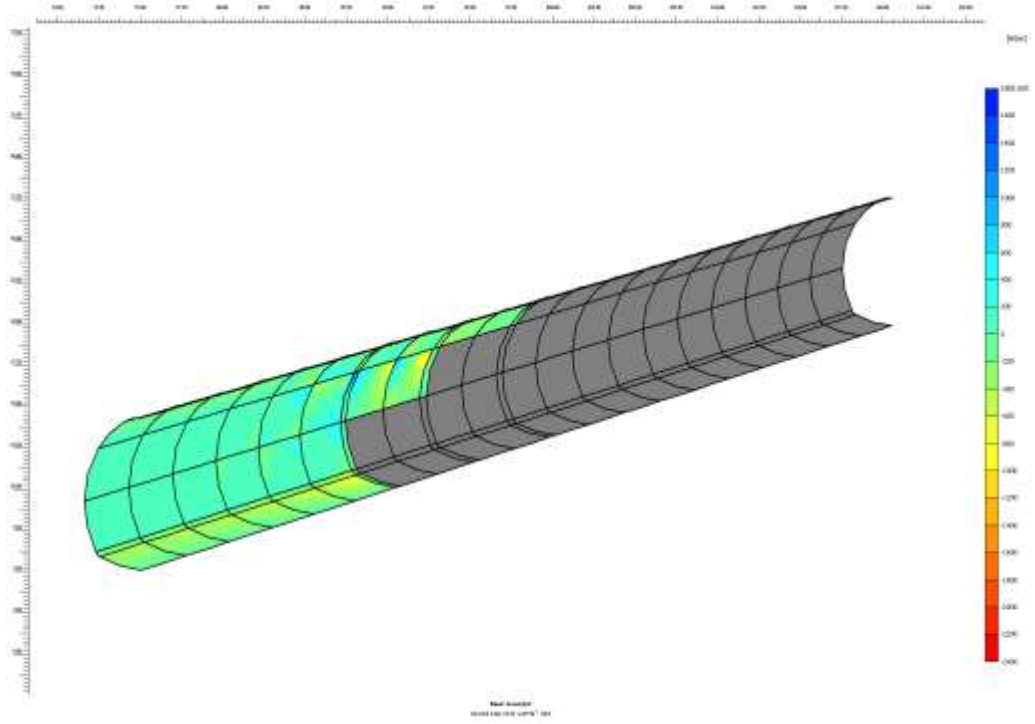




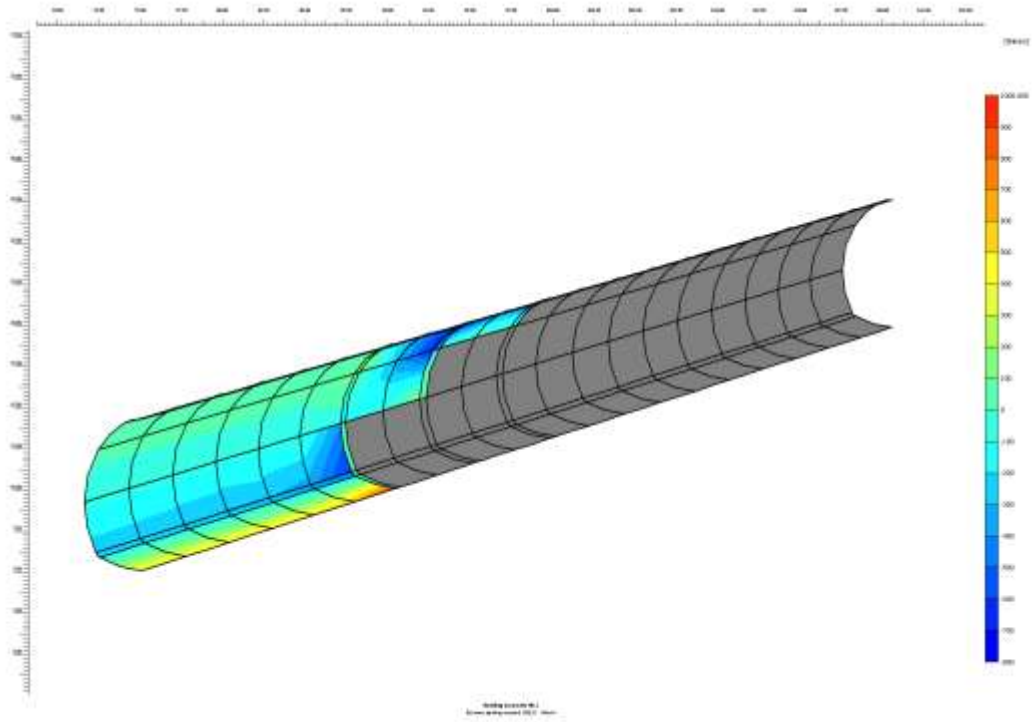
Şekil 4.16 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan kesme kuvvetinin renk konturlarıyla gösterimi (Q12: Maksimum 8790 kN/m)



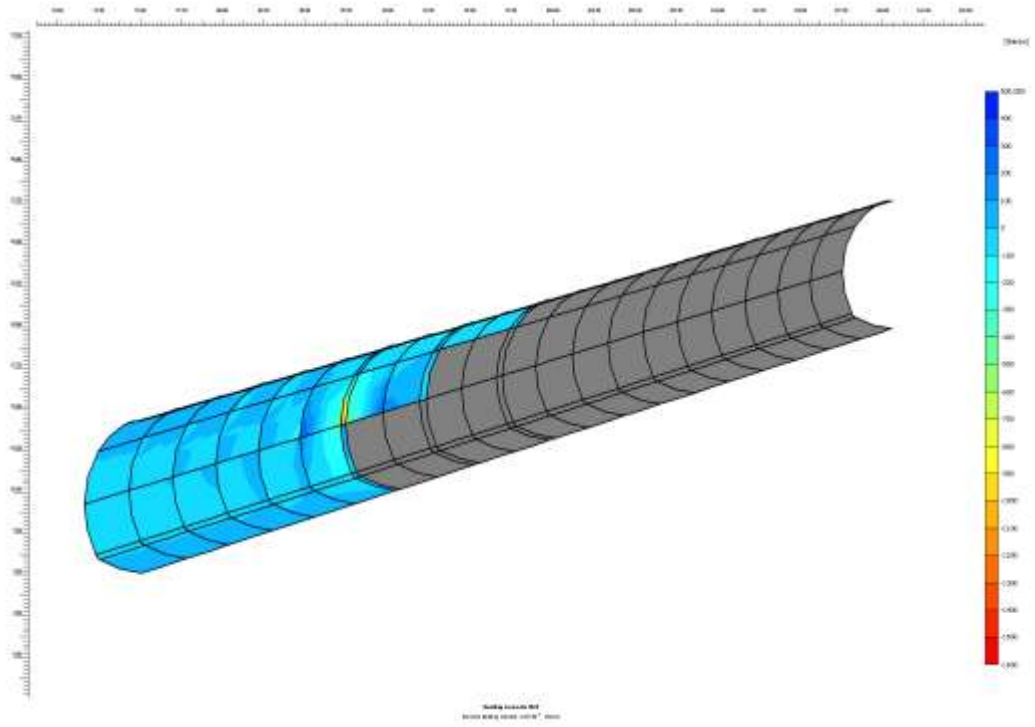
Şekil 4.17 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan kesme kuvvetinin renk konturlarıyla gösterimi (Q23: Maksimum 1920 kN/m)

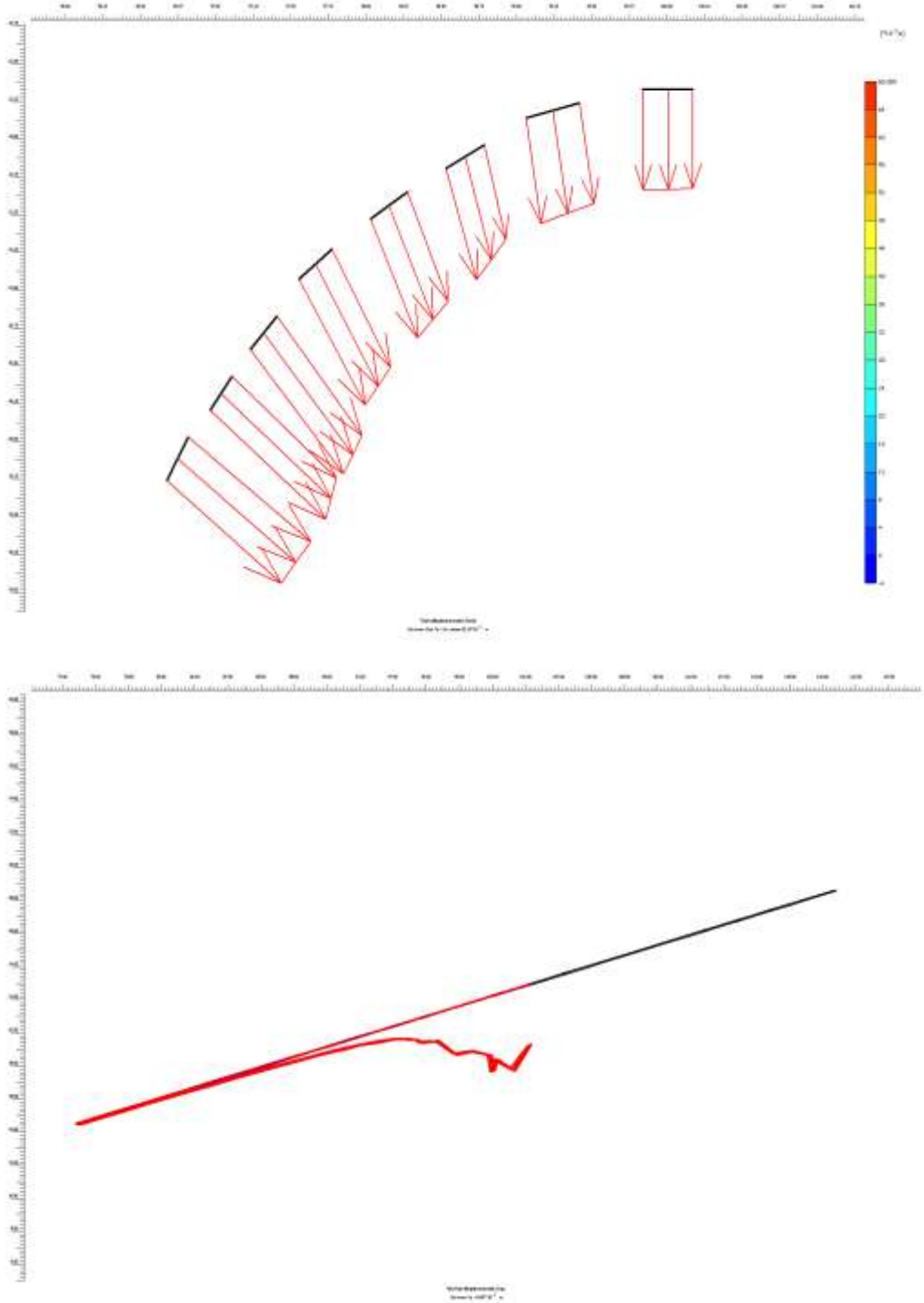


Şekil 4.18 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan kesme kuvvetinin renk konturlarıyla gösterimi (Q13: Maksimum 2290 kN/m)

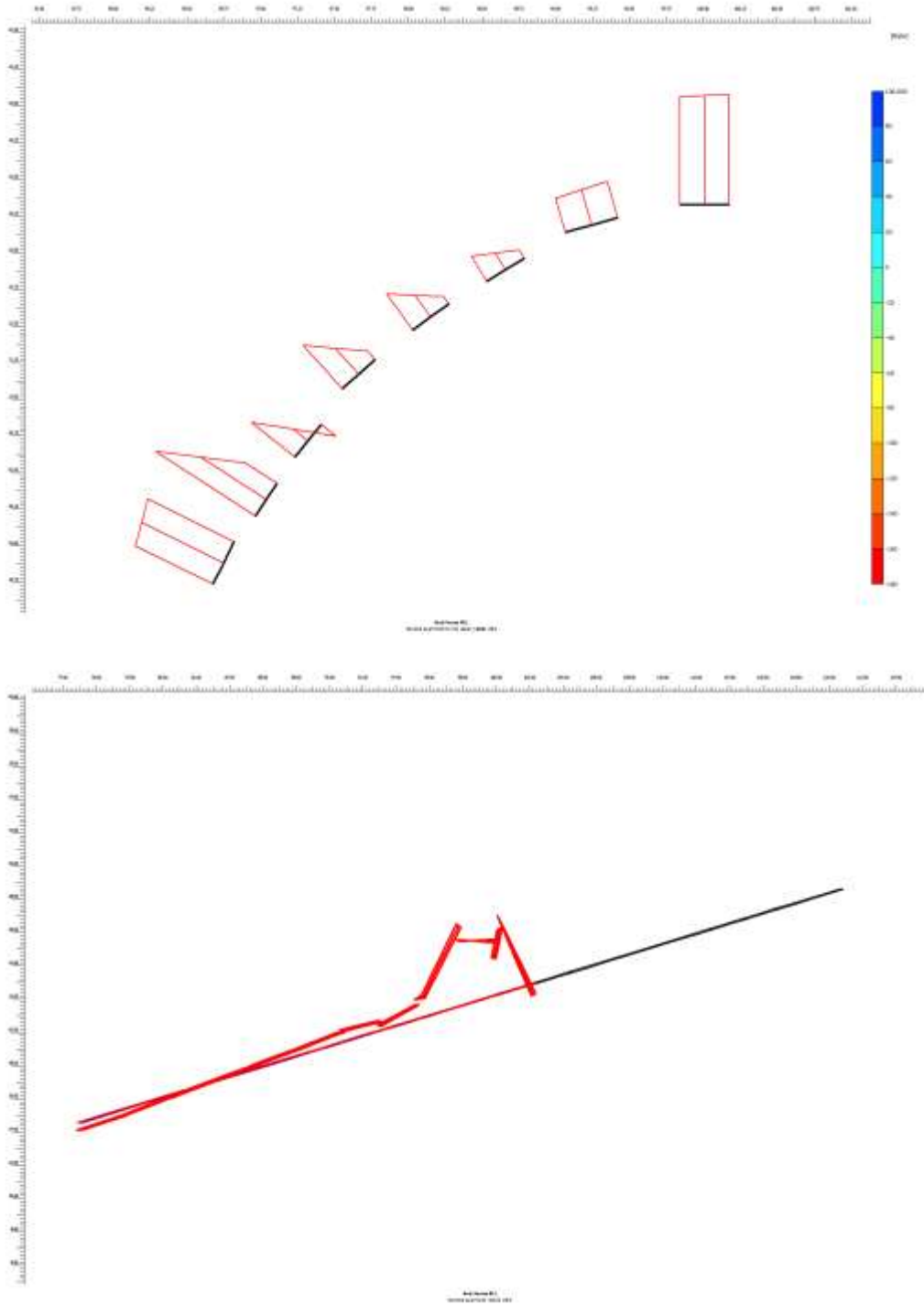


Şekil 4.19 2 inç Çelik Boru uygulanması halinde ön destekleme elemanlarında oluşan eğilme momentinin renk konturlarıyla Gösterimi (M11: Maksimum 929 kNm/m)

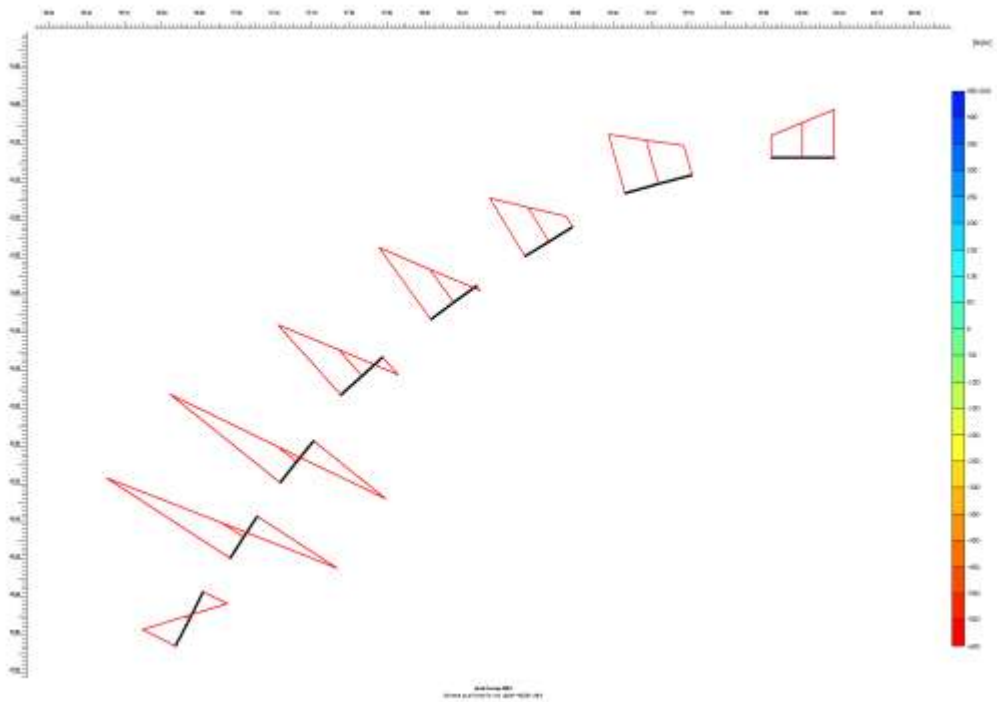
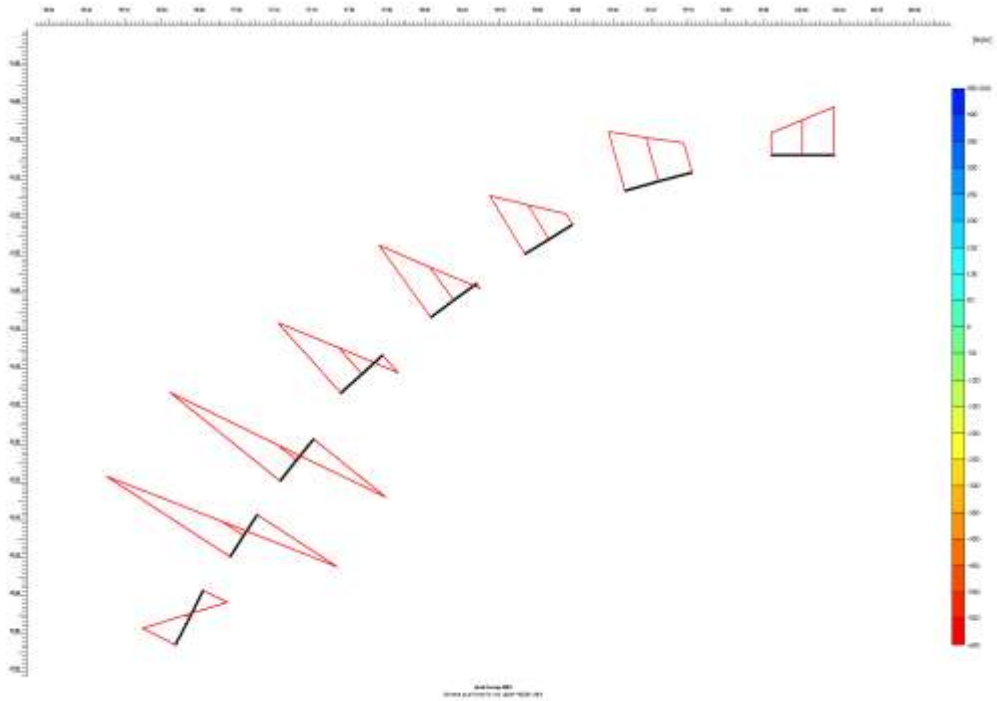




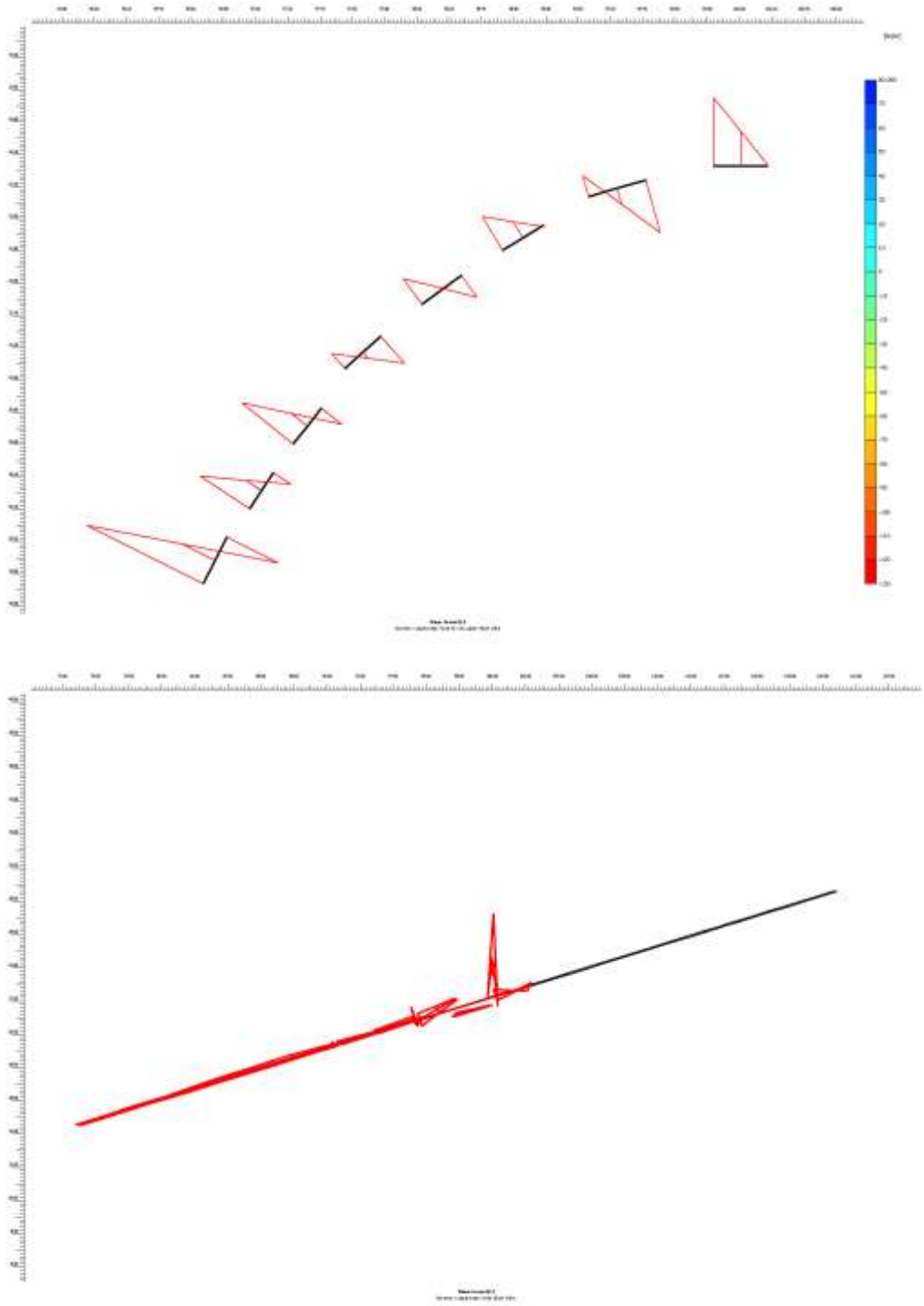
Şekil 4.21 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan düşey deformasyonun gösterimi (Maksimum 5 mm)



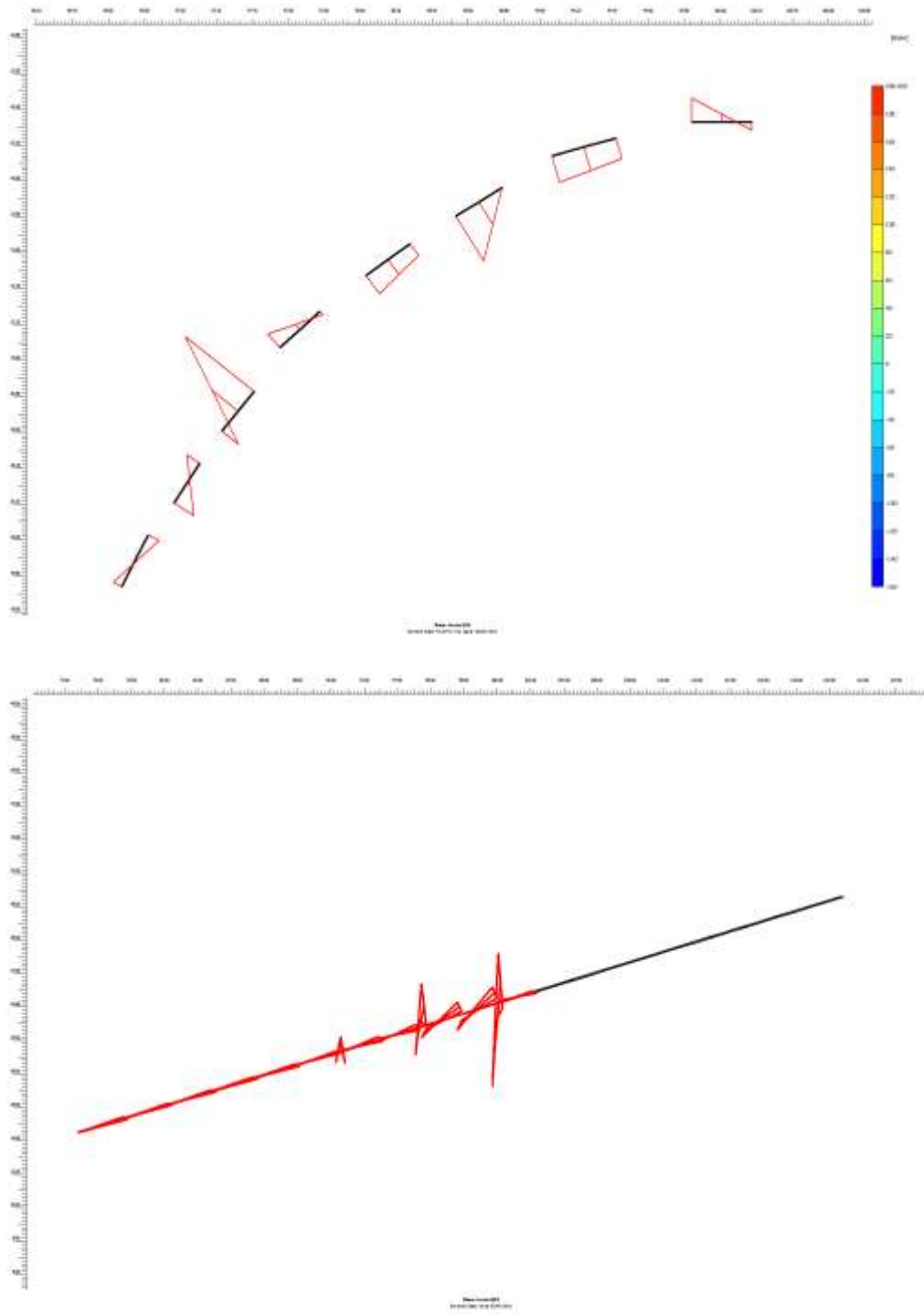
Şekil 4.22 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan aksel kuvvetin gösterimi (Maksimum N11: 118,8 kN/m)



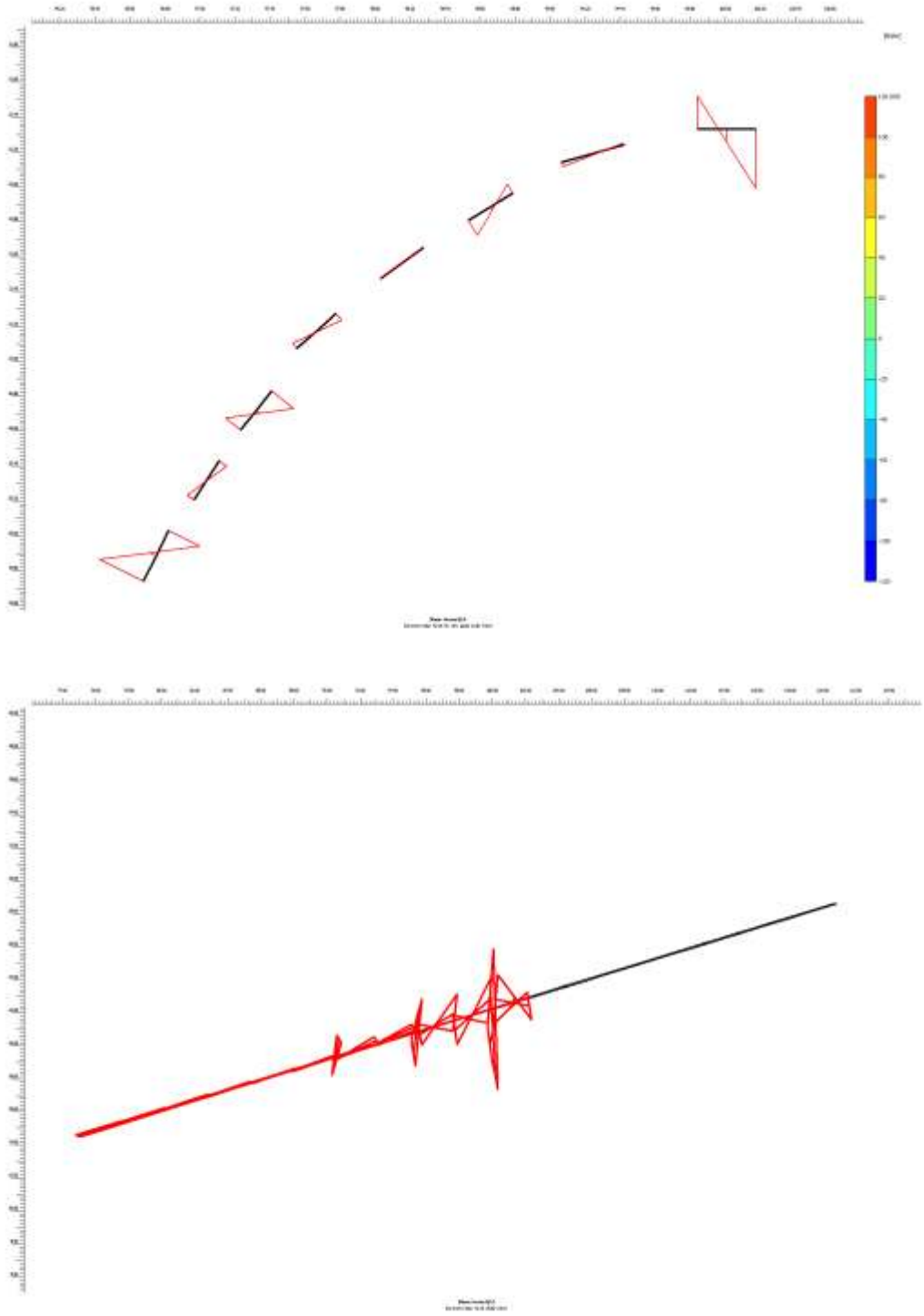
Şekil 4.23 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan aksel kuvvetin gösterimi (N22: Maksimum 402,2 kN/m)



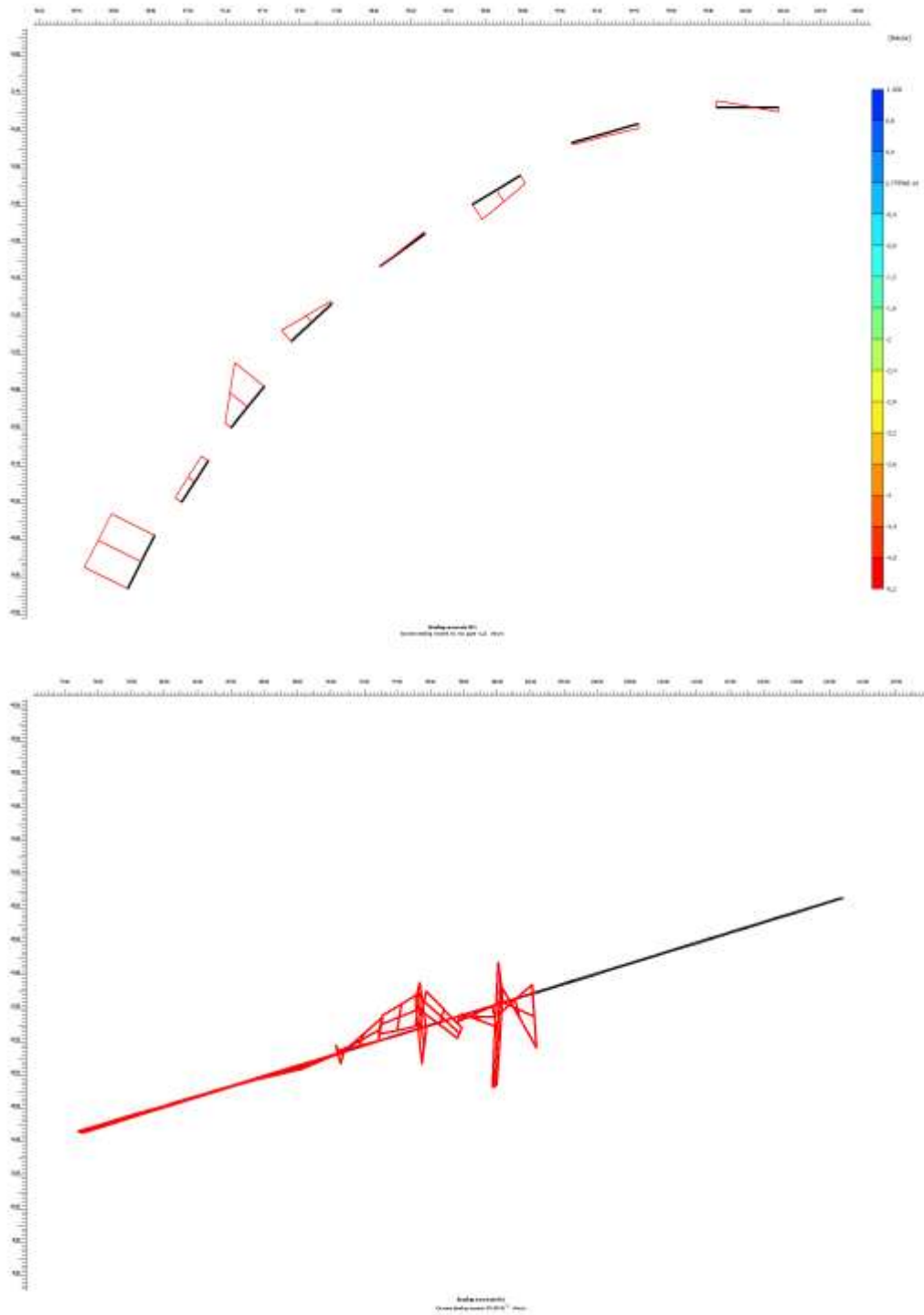
Şekil 4.24 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan kesme kuvvetinin gösterimi (Q12: Maksimum 95,01 kN/m)



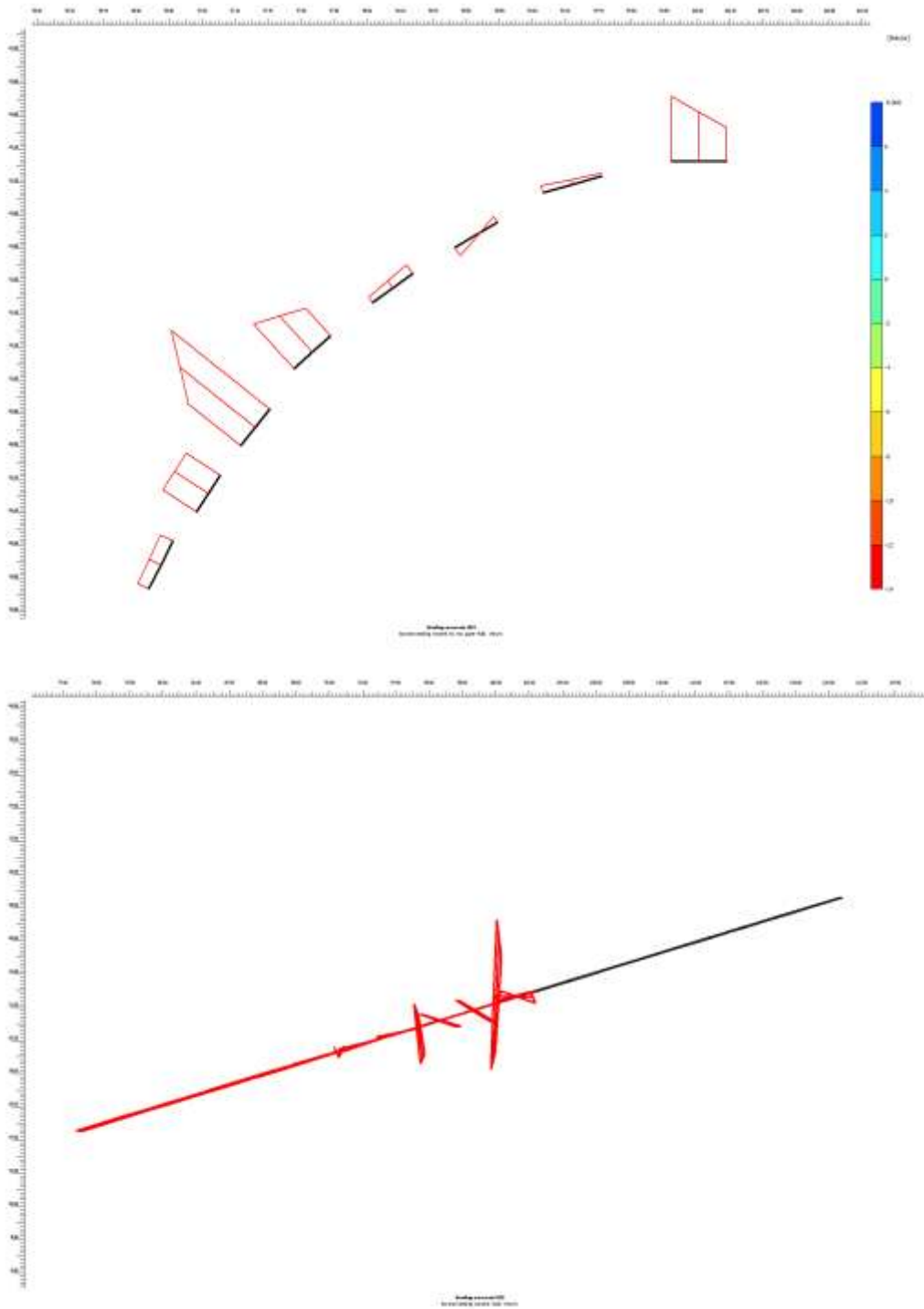
Şekil 4.25 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan kesme kuvvetinin gösterimi (Q23: Maksimum 83,50 kN/m)



Şekil 4.26 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan kesme kuvvetinin gösterimi (Q13: Maksimum 33,83 kN/m)



Şekil 4.27 2 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan eğilme momentinin gösterimi (M11: Maksimum 1,23 kNm/m)



Şekil 4.28 Şekil 4.28 4.292 inç Çelik Boru Uygulanması halinde çelik borularda oluşan eğilme momentinin gösterimi (M22: Maksimum 9,80 kNm/m)

BÖLÜM BEŞ

SONUÇ

İzmir Metrosu 3 Aşama İnşaatı kapsamında Evka 3-Bornova güzergahında açılacak olan tünelin ön destekleme sisteminin analiz edilmesi amacıyla **Km: 13+860-14+096** arası uygulanması öngörülen C4 klas destekleme sisteminin Sonlu Elemanlar (Finite Elements) yöntemi ile nümerik çözümü yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda Şekil 4.5 ve 4.7’de görüldüğü üzere maksimum toplam yer değiştirme miktarı 6 mm olarak bulunmuştur. Aynı şekiller yorumlandığında deformasyonların tünel aynasında ve yeryüzünde oluşacağı görülmektedir. Sığ tünelcilikte en zayıf yer olan ayna stabilitesine imalat aşamalarında dikkat edilmesi gerekliliği açıkça görülmektedir. Yeryüzündeki deformasyonların büyük bölümünün uygulanmış olan sürşarj yükü ($q= 75\text{kN/m}^2$) kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Elde edilen yeryüzü oturma değerlerinin 4,5 mm dolaylarında olduğu saptanmıştır. Bu değerler güvenli şekilde tünelin açılmasına izin verecek seviyededir. Şekil 4.6’da verilmekte olan yatay deformasyonlara bakıldığında ise tünel tavanında çok az miktarda deformasyon olduğu buna karşılık olarak tünel yan duvarlarında 1,45 mm’lik bir açılma olduğu gözlemlenmektedir. Düşey yer değiştirmelere bakıldığında (Şekil 4.8) tünelin tavanında yaklaşık 4 mm, yer yüzünde ise 5,84 mm’lik bir düşey deformasyon olduğu görülmektedir. Bu değerler 10mm olan kabul edilebilir sınırın altındadır. Tünel etrafında oluşan efektif gerilmeler ve toplam gerilmeler (Şekil 4.9 ve 4.10) maksimum 0,8 MPa ($800,43\text{ kN/m}^2$) olarak belirlenmiştir. Tünelin en zayıf bölgesi olan tünel aynasında oluşan gerilmeler 0,5-1 Mpa civarlarındadır. Bu değerlerin düşük olması kullanılan çelik boru kemerin işe yaramasından kaynaklanmaktadır. Püskürtme betonda oluşan maksimum toplam deformasyon tünelin tavanında aşağı doğru 5,5 mm ve tünelin tabanında yukarı kabarma yönünde 0,4 mm olarak belirlenmiştir.

Çelik borularda oluşan deformasyonların maksimum toplam yer değiştirme 4,32 mm olarak gerçekleşmiştir. Bu deformasyonun en önemli nedeni tünel önünde hareket etmek isteyen zeminin oluşturduğu yüküdür. Şekil 4.27’de verilen çelik borularda oluşan eğilme momentleri incelendiğinde en yüksek eğilme momentinin 16,48

kNm/m olduğu belirlenmiştir. Eksenel kuvvet ve kesme kuvvetleri incelendiğinde maksimum eksenel kuvvetin 975,54 kN/m ve maksimum kesme kuvvetinin 484,72 kN/m olduğu görülmektedir. Bu değerler elik boruların yenilmesini sağlayacak düzeyde olmadığı için kazı süresince uygun yerleştirilen elik borular işlev görecektir.

elik Boru Kemer Uygulaması genellikle 4 in'lik elik borular ile yapılmaktadır. Bu uygulama özel tecrübe istemekle birlikte 4 inch'lik elik boruların yerleştirileceği delikleri tünel içerisinde delebilmek için özel makine gerekmektedir. Bu durumda, tünel aynasında hem elik boru kemerlerin oluşturulması için ayrı bir makine, hem elik boru kemer bindirmelerinde bulonların yerleştirilmesi için ayrı bir makine hemde kazının yapılması için ayrı bir makine gerekli olabilmektedir. Bu uygulamaya alternatif olarak 2 in'lik elik Boru Kemer Uygulamasının yeterli olduğu durumlarda ise sadece bir makine ile hem kazı hem de elik boru kemer uygulaması yapılabilmektedir. Böylelikle hem makine kullanım oranı arttırılarak proje maliyetlerine olumlu etki yapılabilmekte hem de miktar olarak daha az elik boru kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

Aksoy, C. O. & Onargan, T., (2010). The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. *Tunneling and Underground Space Technology*, 25, 553-559.

Aksoy, C. O., Onargan, T., Yenice, H., Küçük, K., Köse, H., (2006). Determining the Stress and the Convergence at Beypazarı Trona Field by Three Dimensional Elastic-Plastic Finite Element Analysis: A Case Study. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 43(2), 166-178.

Barisone, G., Pigorini, B., ve Pelizza, S. (1982). *Umbrella Arch Method For Tunneling in Difficult Conditions- Analysis of Italian Cases*. Proceedings of 4th Congress of International Association of Engineering Geology, New Delhi, 4, 15-27.

Bozkurt, M., (1987). *Tüneller Ders Notları*. İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul

Cundall, P.A. (1971). *A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems*. Proceedings of the International Symposium Rock Fracture, ISRM, Nancy, II-8, vol. 1.

Cundall, P.A. (1974). *Rational design of tunnel supports: a computer model for rock mass behaviour using interactive graphics for the input and output of geomaterial data*. Technical Report MRD- 2-74, Missouri River Division, US Army Corps of Engineers, NTIS Report No. AD/A-001 602, 1974.

Cundall, P.A. (1980). *UDEC—a generalized distinct element program for modelling jointed rock*. Report PCAR-1-80, Peter Cundall Associates, European Research Office, US Army Corps of Engineers, 1980.

- Cundall, P.A. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model— Part I: a scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*. 25(3):107–16.
- Desai, C.S, Zamman, M.M., Lighter, J.G., Siriwardane, H.J. (1984). Thin-layer element for interfaces and joints. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 8:19-43.
- Erdoğan, B., (1990). *İzmir-Ankara Zonu'nun İzmir ile Seferihisar arasındaki stratigrafisi ve tektonik evrimi*. T.P.J.D. Bült., C2/1.
- Ghaboussi, J., Wilson, E.L, Isenberg, J. (1973). Finite element for rock joints and interfaces. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 99, SM10
- Geo-Fronte Research Association (1994) . *Technical Report on the Rodin Jet Fore-Pling (RJFP) Method*.
- Goodman, R.E., Taylor R.L., Brekke T.L. (1968). A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 94, SM3.
- Goodman, R.E. (1976). *Methods of geological engineering in discontinuous rocks*. San Francisco, West Publishing Company.
- Gribbs, P.W., Lowrie, J., Keiffer, S., ve McQueen, L. (2002). *M5 East-Design of a Shallow Soft Ground Shotcrete Motorway Tunnel*. Proceedings of the 28th ITA-AITES World Tunneling Congress, Sydney, Australia.

- Harrison, J.P., & Hudson J.A. (2000). *Engineering rock mechanics. Part 2: illustrative workable examples*. Oxford: Pergamon
- Hudson, J.A. (2001). *Rock engineering case histories: key factors, mechanisms and problems*. Proceedings of the ISRM Regional Symposium EUROCK2001, Espoo, Finland.
- Hoek, E., (2001). Big tunnels in bed rock. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, September, 127, No.9, The Thirty-sixth Karl Terzaghi Lecture
- Jimeno C. L. (2000). *Manual de Tuneles y Obras Subterraneas*, 15 Mayıs 2011, <http://uww.ita-aites.org/index.php?id=222>.
- Jing, L. (2003). A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40: 283-35.
- Kahyaoğlu, H., (2008). *TAG otayolu özelinde tünel işleri ve Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi*, Ankara: İnşaat Mühendisleri Odası
- Karakuş, M. & Fowell, R.J. (2004). *An insight into the New Austrian Tunnelling Method (NATM)*. ROCKMEC2004-VII th Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas, Türkiye.
- Katona, M.G. (1983). A simple contact-friction interface element with applications to buried culverts. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 7:371-84.

- Kıncal, C. (2005). *İzmir iç körfez çevresinde yer alan birimlerin coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak depremsellik açısından değerlendirilmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İZMİR
- Kim, D.Y., Lee, H.S., Chun, B.S., ve Jung, J.J. (2009). A study of the field tests and development of quantitative two-dimensional numerical analysis method for evaluation of effects of umbrella arch method. *Tunneling Technology*, 11(1), 57-70.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., (1992). *Tünel ve kuyu açma*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:145, İzmir.
- Leca, E. & Donrmieux, L. (1990). Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional materials. *Geotechnique*, 40(4), 581-606.
- Lorig, L.J. & Brady B.G.H. (1984). *A hybrid computational scheme for excavation and support design in jointed rock media*. Proceedings of the Symposium Design and Performance of Underground Excavations.
- Miura, K. (2003). Design and construction of mountain tunnels in Japan. *Tunneling and Underground Space Technology*, 18, 115-126.
- Muraki, Y. (1997). *The umbrella method in tunneling*. Master Thesis, MIT-Department of Civil and Environmental Engineering.
- Onargan, T., Aksoy C.O., Küçük K., Kun M., (2008). *İzmir hafif raylı sistem 3. Aşama bornova metro tünel inşaatı ön ve nihai destekleme projesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü

Oreste, P.P. & Peila, D. (1998). *A new theory for the steel pipe umbrella design in tunneling*. Proceedings of ITA-AITES 1998 World Tunnel Congress, Sao Paolo, Brasil, 1033-1040.

Özer, S. ve İrtem, O., (1982). *Bornova Güneyi (İzmir) Üst Kretase kireçtaşlarının stratigrafi ve fasiyes incelemesi*. Türkiye Jeoloji Kurultayı, Ankara, Bildiri Özetleri, 47.

Şeker, Ö., (2008). *Yeni Avusturya prensiplerine göre tünel kaplama tasarımı*. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Vardar, M., (1982). *Yeraltı kaya yapıları mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin ana ilkeleri*. Ankara: Jeoteknik-2, DSİ Yayını, s.79-94

Volkman, G.M. & Schubert, W. (2006). *Contribution to the design of tunnels with pipe roof support*. Proceedings of 4th Asian Rock Mechanics Symposium, Singapore, 115-128.

Wang, H.T., & Jia, J.Q. (2009). Face stability analysis of tunnel with pipe roof reinforcement based on limit analysis. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 14, Bundle G, 1-15.

Zienkiewicz, O.C., Best, B., Dullage, C., Stagg, K. (1970) *Analysis of non-linear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems*. Proceedings of the Second International Congress on Rock Mechanics, Belgrade